

Treball de Fi de Grau

Grau en enginyeria en tecnologies industrials

**Modelado y diseño de un sistema de refrigeración
para una pila PEM de alta temperatura**

MEMORIA

Autor: David Sauqué Sala
Director: Maria Serra
Convocatoria: Mayo 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

El proyecto trata sobre el modelado, diseño y control de un sistema de refrigeración para una pila de combustible con membrana de intercambio protónico de alta temperatura (HT- PEMFC, por sus siglas en inglés). El proyecto se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Pilas de Combustible del Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (IRI), CSIC-UPC, situado en la facultad de Matemáticas y Estadística de la UPC.

El proyecto empieza definiendo los componentes que forman parte de una pila de hidrógeno de membrana de intercambio protónico, las reacciones químicas que se producen en su interior y su funcionamiento básico.

Una vez conocido el funcionamiento básico de una PEMFC, el proyecto muestra las características técnicas de la pila HT-PEMFC del laboratorio de pilas de combustible del IRI, que en su día fue proporcionada por el fabricante ZBT – Zentrum für Brennstoffzellen Technik-. Estos datos técnicos servirán para hacer una serie de cálculos previos a los ensayos experimentales para tener una primera idea del mínimo caudal de aire necesario para refrigerar la pila trabajando a una intensidad de 60A.

Una vez estudiada nuestra pila y obtenidos los primeros resultados teóricos, lo que se hace es planificar los experimentos que se van a llevar a cabo en la pila.

Concluidos los ensayos, se prosigue a implementar un modelo dinámico teórico en el entorno de Simulink–MATLAB-. Para la determinación de los parámetros del modelo se usan los datos experimentales extraídos de los ensayos.

El modelo incorpora un controlador de temperatura de la pila que tiene el caudal de aire de refrigeración como variable manipulada.

Acabada la fase de determinación de parámetros del modelo, se analiza el comportamiento del sistema a partir de simulaciones. Este análisis nos permitirá saber qué nuevo sistema de refrigeración se requiere para mantener una temperatura constante a una corriente de la pila de 60A.

Como en todo proyecto, se incluye un presupuesto económico así como un estudio sobre el impacto medioambiental y social.

Para concluir el proyecto, se exponen las conclusiones a las que se ha llegado una vez finalizado el estudio completo.

Tabla de contenidos

Resumen.....	1
Prefacio	5
1. Introducción.....	6
1.1 Objetivos del proyecto	6
1.2 Alcance del proyecto	6
1.3 Planificación temporal del proyecto	6
2. Funcionamiento básico y estructura de una pila de combustible de membrana polimérica.....	8
2.1 Principio de funcionamiento de una pila de hidrógeno.....	8
2.2 Pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC). Principio de funcionamiento.....	8
2.3 Elementos de la pila.....	10
2.4 Potencial de la pila.....	11
2.5 Eficiencia teórica.....	12
2.6 Pérdidas.....	12
2.7 Curvas de polarización	13
2.8 Características de una pila PEM de alta temperatura (HT-PEMFC).....	14
3. Características de la pila proporcionada por el fabricante ZBT -Zentrum für Brennstoffzellen Technik-	15
3.1 Introducción	15
3.2 Control de temperatura.....	16
3.3 Comportamiento eléctrico	17
3.4 Curvas de polarización de la pila HT-PEMFC del laboratorio	18
4. Cálculos previos a los experimentos.....	19
4.1 Caudal volumétrico de aire de refrigeración necesario para trabajar a $I = 60A$ sin que la pila supere los $160^{\circ}C$	19
5. Experimentos.....	20
5.1 Razón de ser de los experimentos.....	20
5.2 Calibración de los termopares	20
5.3 Experimento con los termopares	24
5.4 Experimento con el sensor de velocidad de aire	31
5.5 Resultados	32
6. Modelo dinámico en Simulink -MATLAB-.....	35
6.1 Modelo matemático	35
6.2 Implementación en MATLAB-Simulink.....	37
6.3 Ajuste de parámetros	41
6.4 Validación del modelo para diferentes corrientes de la pila	47

6.5 Empleo del modelo dinámico a intensidad de 60 amperios	50
7. Soluciones propuestas al problema inicial.....	52
7.1 Información técnica de las soluciones.....	52
8. Análisis económico del TFG	54
9. Impacto medioambiental y social.....	57
9.1 Impacto medioambiental.....	57
9.2 Impacto social	58
Conclusiones.....	59
Agradecimientos	60
Bibliografía.....	61
Referencias bibliográficas.....	61
Bibliografía complementaria.....	61
Anexo	62

Prefacio

Desde la revolución industrial, el modelo de generación energética se ha basado en el uso de combustibles fósiles -carbón, gas natural, petróleo-. Desde entonces, el consumo de estas materias primas y las emisiones de contaminantes asociadas a su combustión no han hecho más que crecer. Según la Administración de Información Energética de los Estados Unidos (EIA), la evolución del consumo de petróleo se ha triplicado desde 1960, lo que ha generado serias dudas sobre las reservas disponibles para el futuro.

Los sistemas energéticos actuales han contribuido en la aparición de fenómenos como el efecto invernadero o la lluvia ácida, los cuales representan graves problemas medioambientales.

La escasez de combustibles fósiles y los problemas derivados de las emisiones de éstos, han exigido a los gobiernos de los países industrializados a revisar sus políticas energéticas en busca de fuentes de energía que no generan emisiones de gases de efecto invernadero, tales como las renovables, y de combustibles alternativos para el transporte.

En este contexto, las pilas de combustible que emplean hidrógeno como combustible están atrayendo la atención gracias a su alta eficiencia y al hecho de que su combustión es limpia: los únicos productos de su reacción son calor y agua. Otra ventaja de estos dispositivos es que se pueden utilizar tanto en sistemas portátiles como estacionarios.

El hidrógeno y las pilas de combustible tienen la posibilidad de revolucionar el modo en el que producimos y usamos la energía. Sin embargo, el uso generalizado del hidrógeno tiene que venir acompañado con el desarrollo de toda la infraestructura necesaria para su producción y distribución, lo que se hace llamar «economía del hidrógeno».

1. Introducción

1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo principal que se persigue es el de mejorar el sistema de refrigeración de la HT-PEMFC fabricada por ZBT –Zentrum für Brennstoffzellen Technik- y adquirida por el Laboratorio de Pilas de Combustible del IRI para que ésta pueda trabajar a una intensidad superior a los 26A actuales. Lo deseable sería poder alcanzar una intensidad de 60A.

Dado este primer objetivo expuesto, estudiar y encontrar el motivo de porqué la pila no puede trabajar actualmente a una intensidad superior a los 26A es otro objetivo que nos marcamos.

También se considera un objetivo del proyecto, la obtención de un modelo dinámico de la pila con su sistema de refrigeración, implementado en MATLAB-Simulink, que permita simular el comportamiento térmico del sistema.

1.2 Alcance del proyecto

En este proyecto se pretende llegar hasta la descripción de un diseño nuevo para el sistema de refrigeración de la pila, analizando sus características y capacidades a través de simulación, y haciendo una selección preliminar de los elementos necesarios disponibles en el mercado.

1.3 Planificación temporal del proyecto

El proyecto se inició el día 4 de noviembre de 2015 y se terminó el día 16 de abril de 2016. Las fases del proyecto así como la duración de cada una de ellas se muestran en el siguiente diagrama de Gantt:

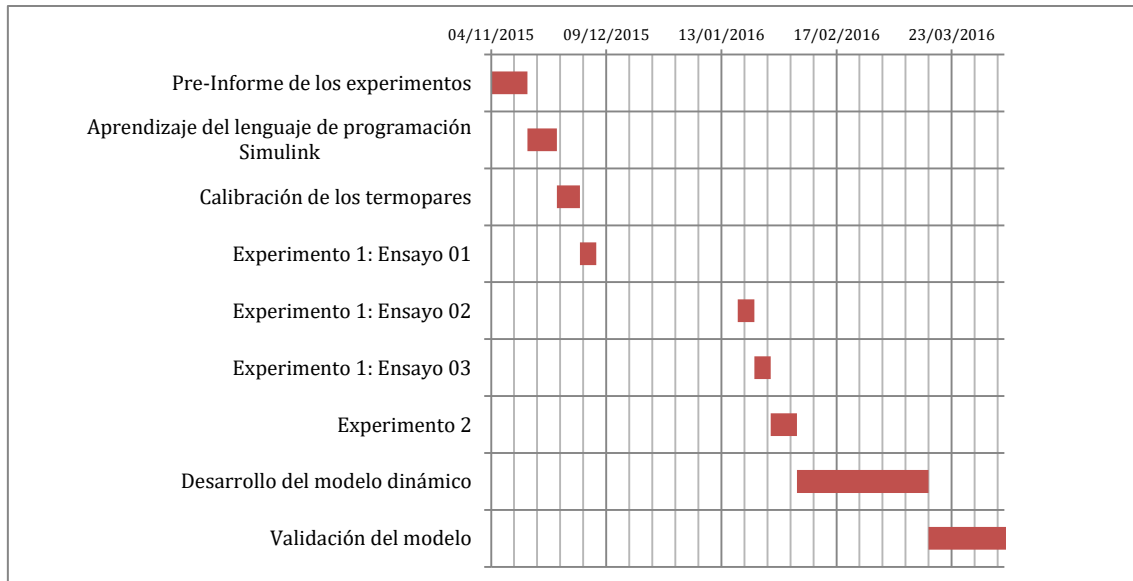


Figura 1 – Diagrama de Gantt del proyecto

Como bien se puede observar en el diagrama, los períodos temporales más largos fueron los que hacen referencia a las fases de desarrollo y validación del modelo.

Comentar también que el proyecto estuvo detenido durante algunos días de diciembre y de enero correspondientes a las fechas de navidad.

2. Funcionamiento básico y estructura de una pila de combustible de membrana polimérica

2.1 Principio de funcionamiento de una pila de hidrógeno

La primera demostración del principio de funcionamiento de una pila de combustible fue llevada a cabo por el abogado y científico William Grove en 1839, al realizar un experimento como el que muestran las figuras 2.a y 2.b. En la figura 2.a, se está produciendo la descomposición del agua en oxígeno e hidrógeno debido al paso de una corriente eléctrica -electrolisis del agua-. Si en la figura 2.a se sustituye la alimentación por un amperímetro lo que se obtiene es la figura 2.b. En este caso, se origina la reacción inversa a la electrolisis -el hidrógeno y el oxígeno se recombinan, y se produce una corriente eléctrica-.

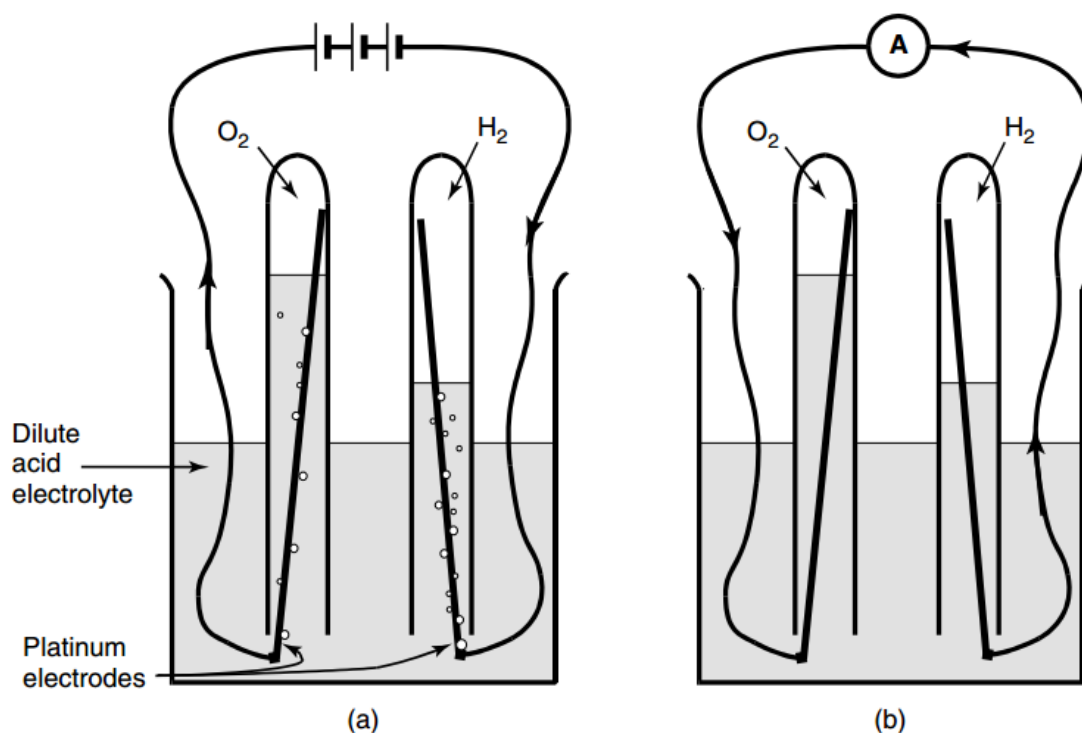


Figura 2 – a) Electrolisis del agua b) Reacción inversa a la electrolisis. (JAMES LARMINIE AND ANDREW DICKS. Fuel cell systems explained. John Wiley & Sons Ltd: 2003)

2.2 Pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC). Principio de funcionamiento.

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten directamente la energía química del combustible en energía eléctrica.

Las pilas se clasifican según el electrolito que emplean y que, de hecho, determina las reacciones que ocurren en los electrodos y el tipo de iones que se transporta a través de él. Se consideran, de forma general, 5 tipos:

- Pilas con membrana polimérica de intercambio de protones (PEMFC)
- Pilas alcalinas (AFC)
- Pilas de ácido fosfórico (APFC)
- Pilas de carbonato fundido (MCFC)
- Pilas de óxido sólido (SOFC)

En el presente trabajo, se tratarán únicamente las pilas con membrana polimérica de intercambio de protones (PEMFC). En este tipo de pilas, el electrolito está constituido por una membrana polimérica que separa la parte anódica y catódica de una celda. Esta membrana actúa como conductor protónico al permitir el paso a través de ella de iones H^+ , pero con la particularidad de ser impermeable al resto de sustancias.

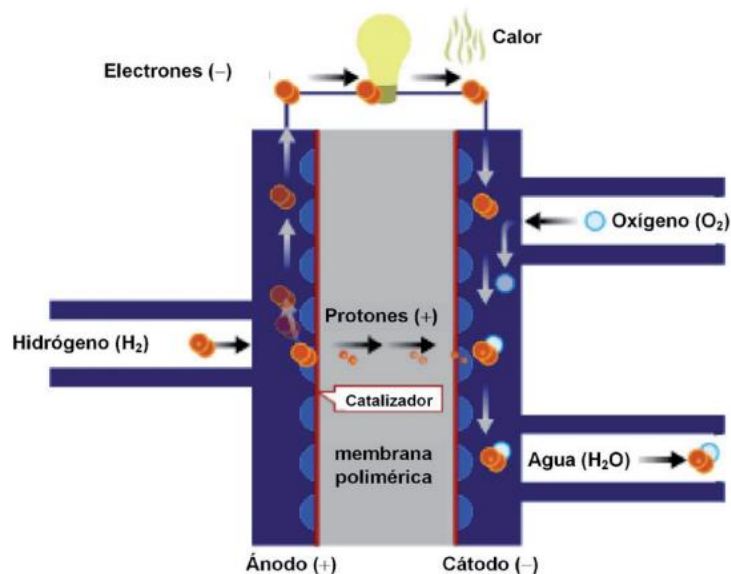


Figura 3 – Esquema simplificado del funcionamiento de una pila de H_2 de tipo PEM. (FÉLIX BARRERAS, ANTONIO LOZANO. Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM. LITEC, CSIC Universidad de Zaragoza: 2012).

La figura 3 muestra un esquema simplificado del funcionamiento de una pila tipo PEM. Una celda se compone de tres zonas: un electrodo cargado negativamente (cátodo), un electrodo cargado positivamente (ánodo), y en medio la membrana electrolítica que separa físicamente los gases a ambos lados. El combustible utilizado es el hidrógeno, el cual es introducido por los canales en la placa bipolar por el lado del ánodo y guiado a través de una capa difusora hasta la capa catalítica, donde tiene lugar la reacción de oxidación del hidrógeno.

Los protones generados en el ánodo cruzan la membrana, mientras que los electrones, que no pueden atravesarla debido a que no es conductora electrónica, pasan por un circuito alternativo en el que se encuentran las capas difusoras y las

placas. Este paso de electrones genera una corriente eléctrica que puede ser aprovechada para la realización de un trabajo.

El aire, por su parte, entra por los canales en la placa bipolar por el lado del cátodo, atraviesa la capa difusora y el oxígeno se combina en la capa catalítica con los protones que vienen de atravesar la membrana y los electrones que provienen del circuito externo, dando como resultado agua y calor.

La formulación de las reacciones químicas expuestas anteriormente es:

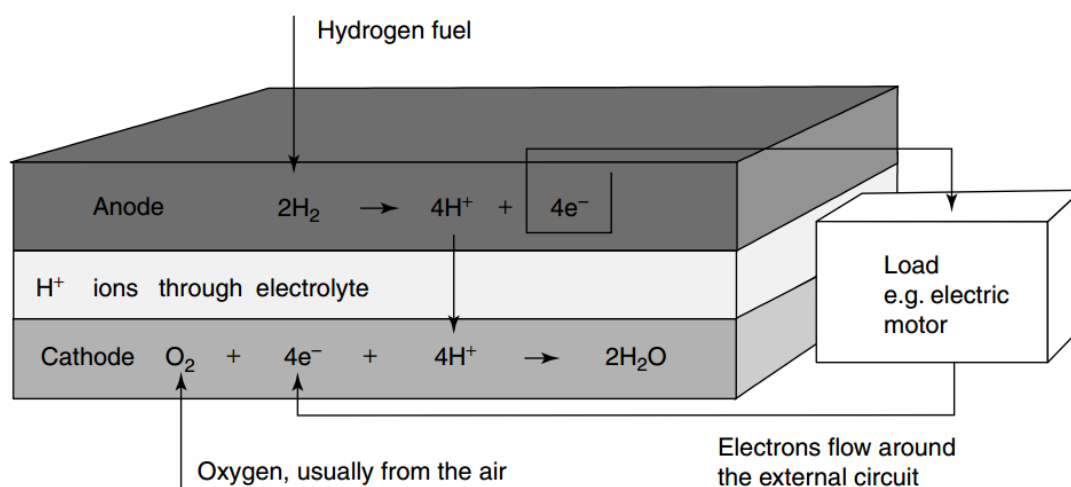
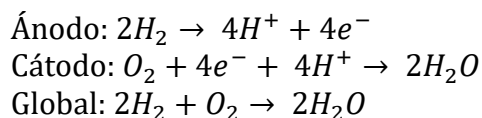


Figura 4 – Reacciones químicas en el lado del ánodo y del cátodo. (JAMES LARMINIE AND ANDREW DICKS. Fuel cell systems explained. John Wiley & Sons Ltd: 2003)

2.3 Elementos de la pila

Una pila PEM está constituida de varias monoceldas apiladas, lo que permite conseguir el voltaje deseado. Los elementos principales que componen una monocelda de una pila tipo PEM son:

Placas bipolares: Es un elemento mecánico de la pila. Sus funciones son:

- Distribuir el flujo de gases sobre los electrodos.
- Ayudar a la evacuación del agua de la pila.
- Separar las monoceldas en el stack.
- Actuar como puentes de conducción eléctrica de la pila.

Capas difusoras: Son capas de materiales porosos, buenos conductores de la electricidad, que distribuyen los gases homogéneamente sobre las capas catalíticas. Sus tareas son:

- Proporcionar contacto eléctrico a los electrones.

- Canalizar el agua generada en el cátodo.

Capas catalíticas: Están formadas por el electrocatalizador, depositado bien sobre la membrana o bien sobre las capas difusoras. El electrocatalizador posibilita la reacción química tanto en el ánodo como en el cátodo. El más utilizado actualmente es el compuesto por partículas de platino.

Membrana: Es la capa central de la pila que separa el ánodo y el cátodo. Debe permitir el paso de protones y ser, al mismo tiempo, impermeable a los gases y a los electrones. Suelen estar hechas de materiales poliméricos.

MEA: Al conjunto de tres capas formado por la membrana y las capas catalíticas de ánodo y cátodo se le llama “Membrana-Electrode Assembly” -MEA-.

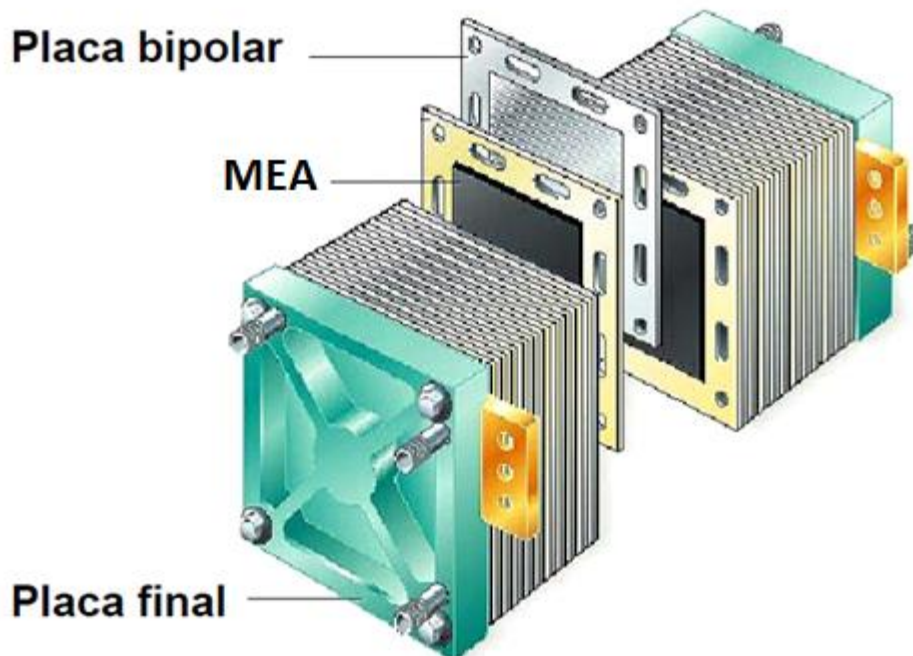


Figura 5 – Componentes de una pila PEM. (JAMES LARMINIE AND ANDREW DICKS. Fuel cell systems explained. John Wiley & Sons Ltd: 2003)

2.4 Potencial de la pila

Idealmente, el trabajo eléctrico máximo $-W_{\text{elect}}$ que se puede obtener, por cada mol de combustible, de una monocelda de una pila de combustible (FC) operada a temperatura y presión constante viene dado por la energía libre de Gibbs (ΔG) de la reacción electroquímica:

$$W_{\text{elect}} = nFE = -\Delta G \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Siendo:

n : número de electrones por molécula.

E : Potencial en voltios.

F : Constante de Faraday (96.487 C/mol).

ΔG : Variación de la energía libre de Gibbs en J/mol.

Aplicando esta ecuación al caso de una pila que emplee H_2/O_2 a 25°C se obtiene el siguiente potencial teórico:

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{237,34}{2 \cdot 96485} = 1,23V \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Si se incluye la dependencia de la presión y la temperatura en G , se obtiene la denominada ecuación de Nernst, que para una pila de hidrógeno indica que:

$$E = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}} \right) \quad [\text{Ecuación 3}]$$

2.5 Eficiencia teórica

La eficiencia de cualquier dispositivo de conversión de energía se define como la relación entre la energía útil producida respecto de la energía total de entrada. En el caso de una pila de combustible usada como generador eléctrico, la energía útil producida es la energía eléctrica generada y la energía de entrada es la entalpía del hidrógeno. Suponiendo que toda la energía libre de Gibbs pueda convertirse en energía eléctrica, la máxima eficiencia teórica posible que se puede obtener con una pila de H_2/O_2 a 25°C y 1 bar es:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34}{286,02} = 83\% \quad [\text{Ecuación 4}]$$

Si el calor producido por la pila también se aprovecha, entonces la eficiencia de la pila es superior. En pilas PEM de alta temperatura, como la estudiada en este proyecto, el intercambio de calor es más fácil, con lo cual el aprovechamiento de energía térmica es más habitual.

2.6 Pérdidas

El potencial real de una pila disminuye respecto de su valor teórico (ideal) debido a pérdidas irreversibles. De forma general estas pérdidas son:

- Pérdidas por activación: Proviene de la energía de activación de las reacciones electroquímicas en los electrodos.

- Pérdidas Óhmicas: Se deben a la resistencia iónica en el electrolito y los electrodos, a la resistencia electrónica en los electrodos y colectores y a la resistencia de contacto. Son proporcionales a la densidad de corriente y dependen del tipo de material utilizado, la geometría del “stack” y la temperatura.
- Pérdidas por concentración (transporte de masa): Son el resultado de las limitaciones debido a las tasas finitas de transferencia de masa de los reactantes y dependen fuertemente de la densidad de corriente, la activación de los reactantes y la estructura de los electrodos.

2.7 Curvas de polarización

El efecto de todas estas pérdidas se puede apreciar en una gráfica V-I que se conoce como curva de polarización de la pila.

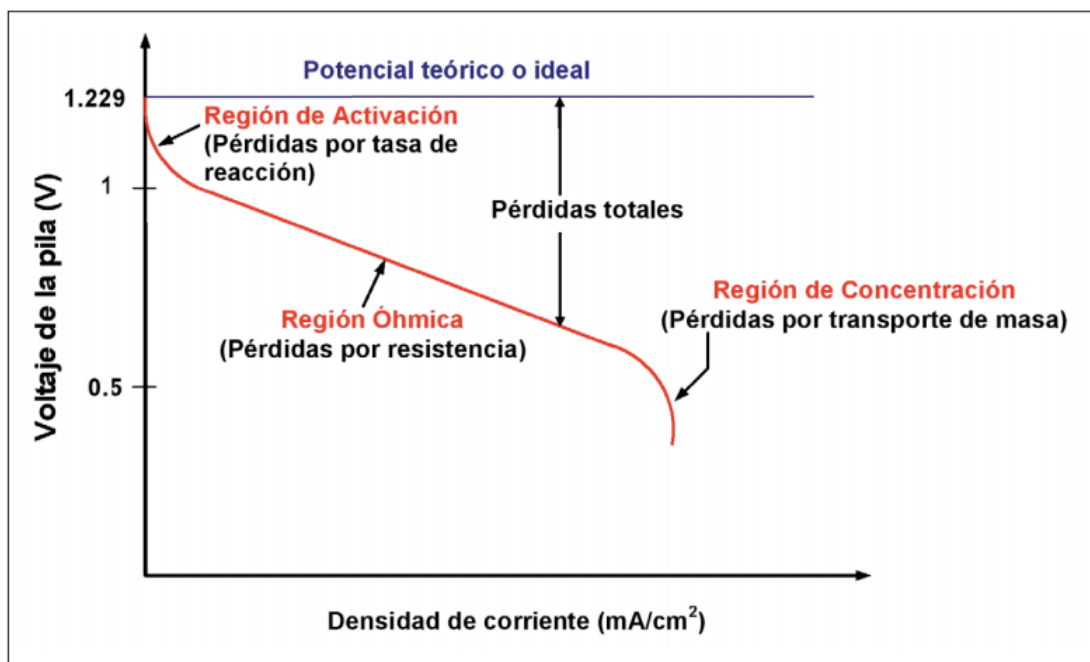


Figura 6 – Curva típica de polarización de una PEMFC. (FÉLIX BARRERAS, ANTONIO LOZANO. Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM. LITEC, CSIC Universidad de Zaragoza: 2012).

2.8 Características de una pila PEM de alta temperatura (HT-PEMFC)

Todo lo descrito en este capítulo 2 sobre las pilas PEM también es aplicable en las pilas PEM de alta temperatura.

En este apartado, se pretende dar una pincelada de las características que presentan las pilas PEM que operan a alta temperatura, algunas de ellas son:

- El salto térmico que se produce en las pilas PEM de alta temperatura es mayor que en las convencionales, por lo que el intercambio de calor se ve favorecido. Este atributo las hace muy interesantes para la cogeneración.
- Presentan menos pérdidas por activación.
- En las pilas PEM de baja temperatura, a veces se produce el bloqueo del paso de los reactantes debido a la presencia de agua líquida en las capas de difusión y en la capa catalizadora. Dado que las pilas PEM de alta temperatura trabajan a temperaturas superiores a los 100 grados centígrados, evitan problemas relacionados con el agua líquida.

3. Características de la pila proporcionada por el fabricante ZBT -Zentrum für Brennstoffzellen Technik-

3.1 Introducción

La pila HT-PEMFC consiste en 12 celdas y se fabricó con la intención de proporcionar 120W de potencia eléctrica.

Eléctricamente hablando las 12 celdas que conforman la pila están conectadas en serie. Las celdas están separadas por placas bipolares de grafito. La pila dispone de 13 placas bipolares y de aletas refrigerantes.

La pila dispone tanto de cuatro entradas como salidas de gas. En la foto sólo se ven las cuatro entradas y salidas de un lado. En el otro lado, se encuentran las otras cuatro.

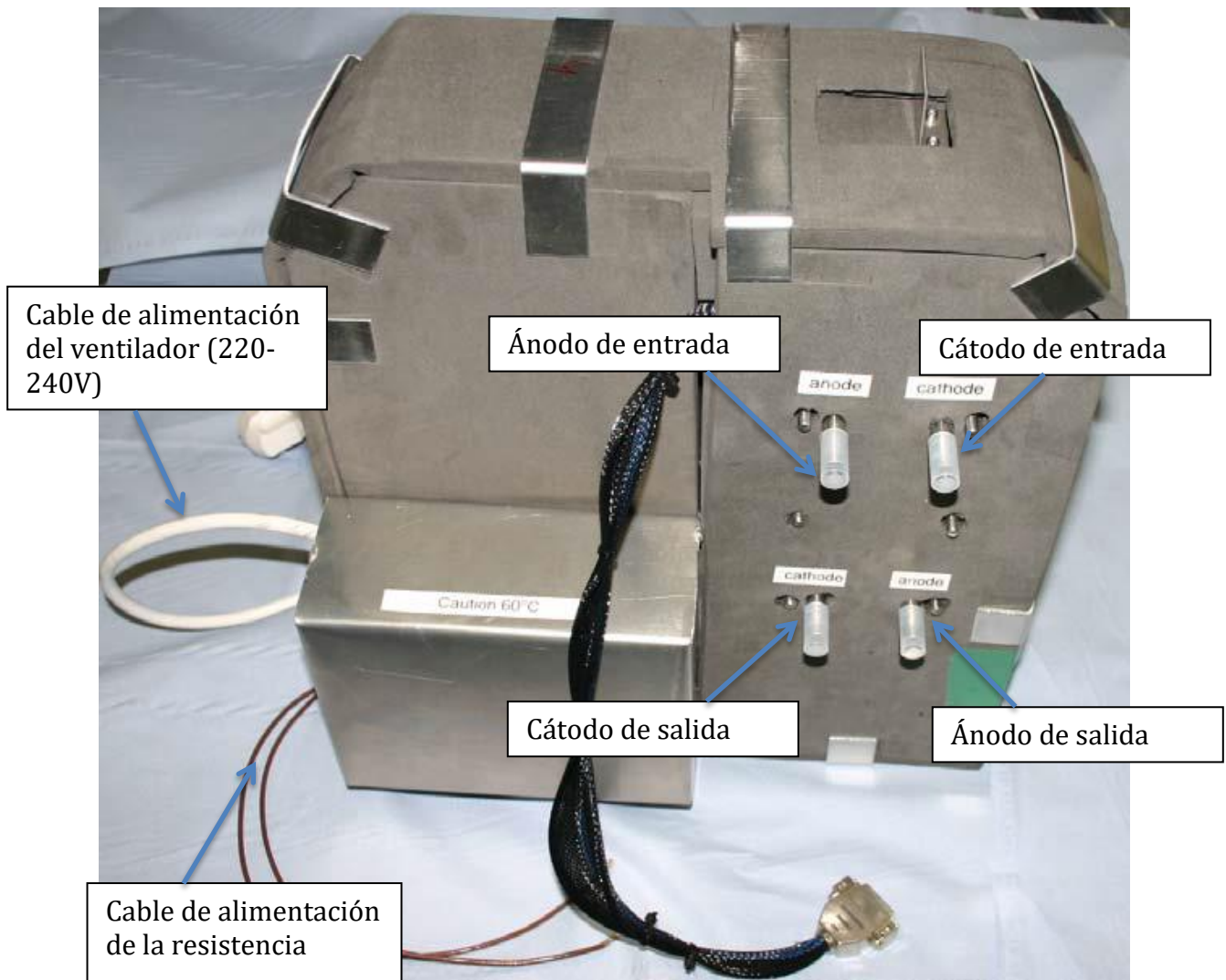


Figura 7 - Pila de combustible y carcasa vista desde el lado del ánodo (USERS MANUAL. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells). ZBTH: 2012)

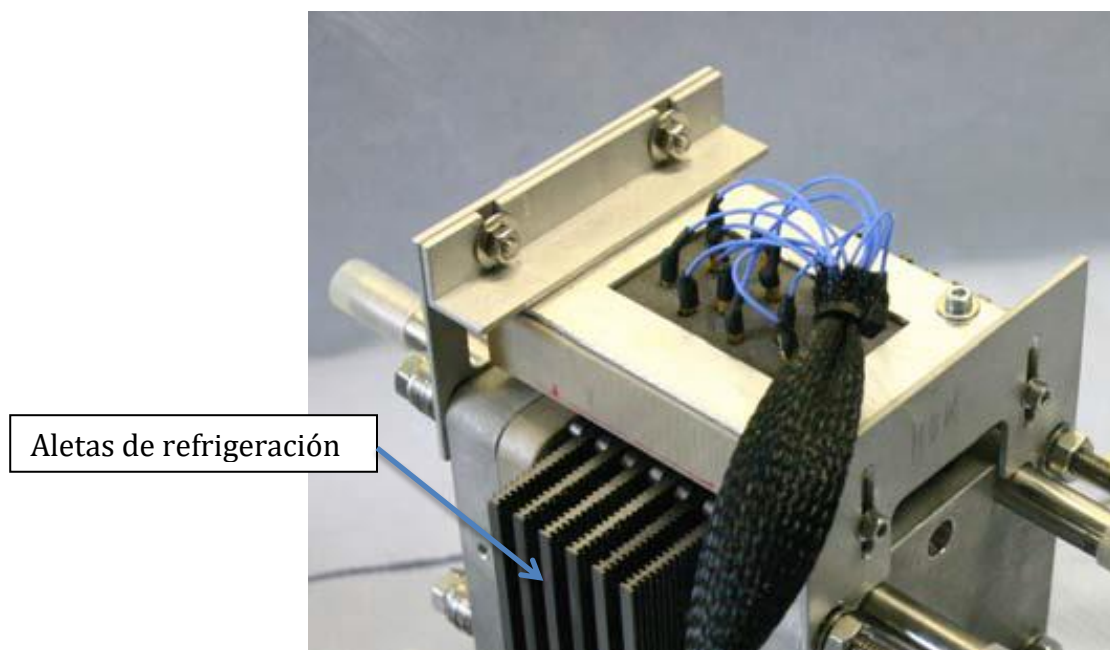


Figura 8 – Celdas de la pila de combustible vistas desde arriba (USERS MANUAL. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells). ZBTHT: 2012)

3.2 Control de temperatura

Antes de poder poner en funcionamiento la pila, ésta debe ser calentada a un mínimo de 140°C . Para conseguir tal objetivo, la pila está instalada dentro de una cavidad aislante que contiene un serpentín calentador y un ventilador. El serpentín calentador debe conectarse a corriente continua (CC) a un máximo de 48V. El ventilador, por su parte, debe conectarse a 230 voltios de corriente alterna y debe de estar siempre encendido para evitar gradientes térmicos considerables que pudieran causar daños en las celdas de la pila.

Los materiales que componen la pila no pueden ser expuestos a temperaturas superiores a los 180°C y la temperatura interna de la pila debe de estar siempre monitorizada. Asimismo, la temperatura de operación de la pila no puede nunca exceder los 180°C .

La cavidad aislante dispone de dos ventanas, una para la entrada de aire a temperatura ambiente, y otra para la salida de aire de refrigeración. El fabricante indica que éstas deben abrirse y cerrarse según las condiciones de operación de la pila. Cuando las ventanas están cerradas, el aire interior circula del ventilador a la pila recursivamente habiendo una recirculación total. Cuando las ventanas están abiertas, dado que la apertura para la recirculación sigue abierta, parte del aire sigue recirculando. Sin embargo, se asume que el caudal volumétrico de aire recirculado con ventanas abiertas es pequeño.

Con ventanas cerradas la pila puede trabajar a un máximo de 18A y con ventanas abiertas hasta los 26A. Se produciría un sobrecalentamiento en caso de superar tales valores límite.

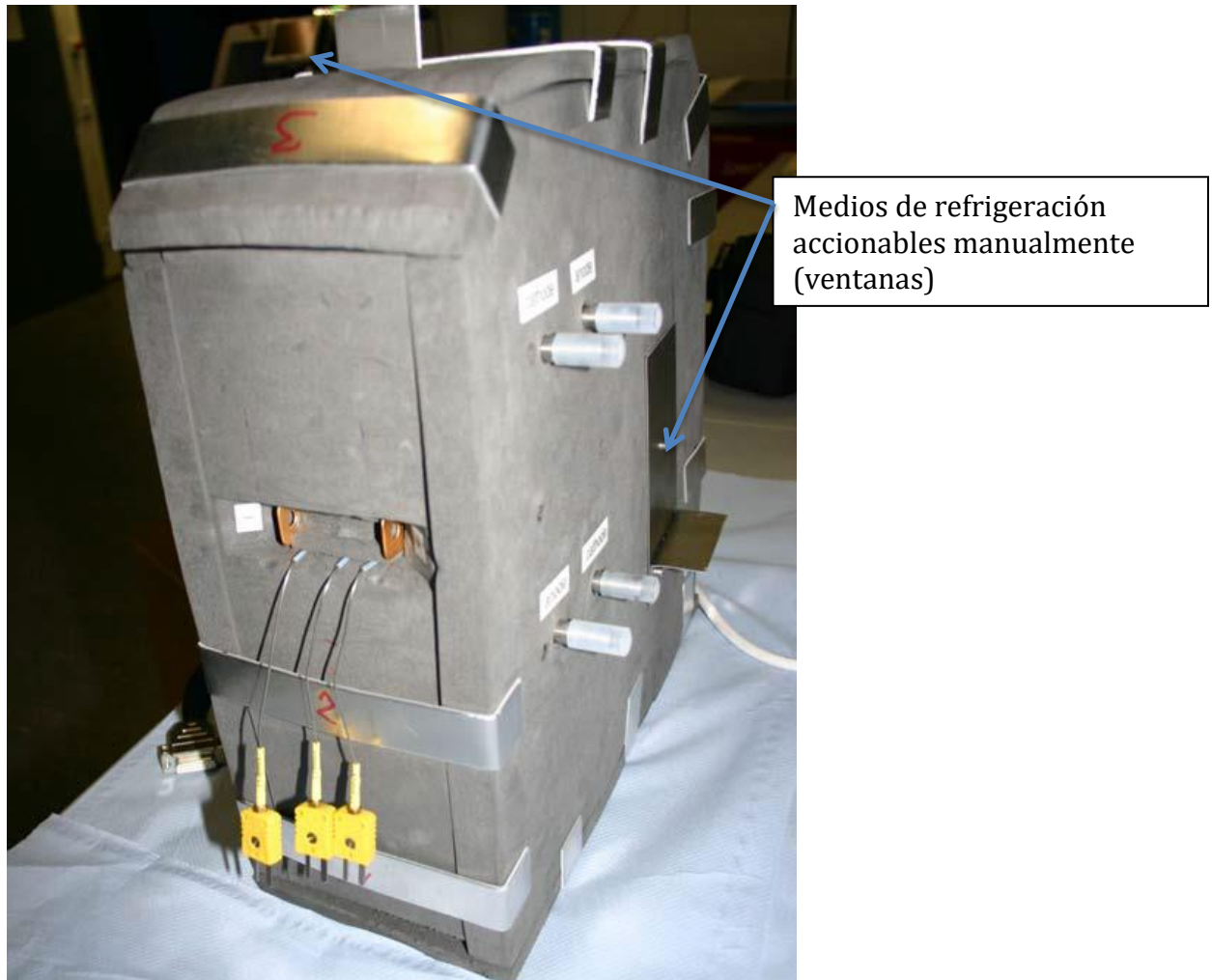


Figura 9 – Termopares en la parte trasera de la pila (USERS MANUAL. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells). ZBTH12: 2012)

Para reducir tensiones mecánicas en los componentes de la pila de combustible, no se pueden superar gradientes térmicos de 2,5K/minuto. Para poner en funcionamiento la pila es necesario alimentar la resistencia calefactora en forma de serpentín a 40V en corriente continua durante aproximadamente 45 minutos.

3.3 Comportamiento eléctrico

El voltaje de circuito abierto (OCV) es de aproximadamente 11 voltios. Es recomendable que el voltaje individual de cada celda no sea menor de 0,4 voltios mientras la pila esté en funcionamiento.

La pila no debe de estar en modo OCV durante más de dos minutos si el voltaje se encuentra por encima de los 10 voltios.

3.4 Curvas de polarización de la pila HT-PEMFC del laboratorio

Las curvas de polarización, de las que hemos hablado en el apartado “2.7 Curvas de polarización”, son gráficas V-I que muestran el efecto de todas las pérdidas irreversibles que se producen en una pila de combustible.

Las curvas de polarización de la pila HT-PEMFC del laboratorio, son las siguientes:

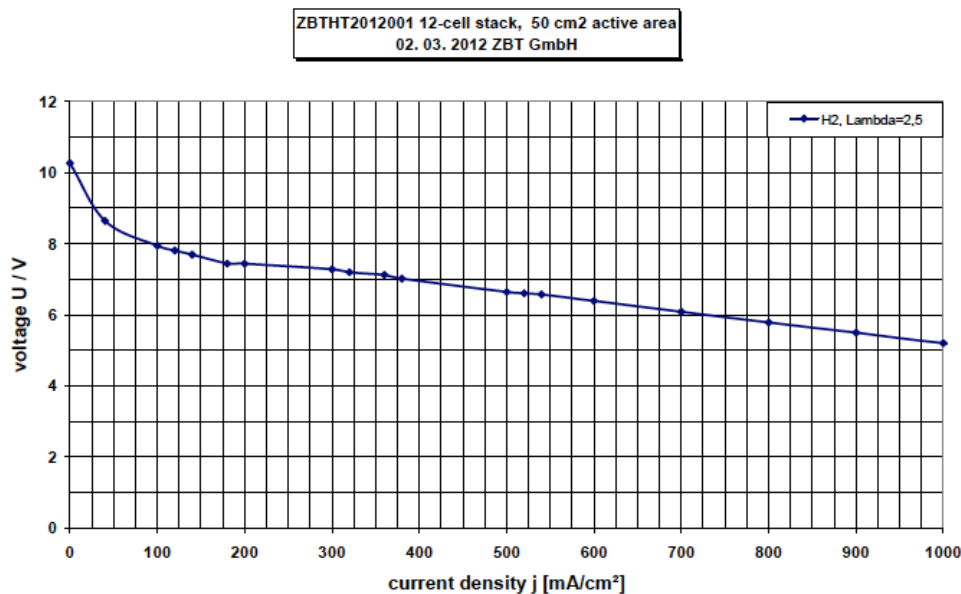


Figure 4: j-V curve of the 12 cell fuel cell stack

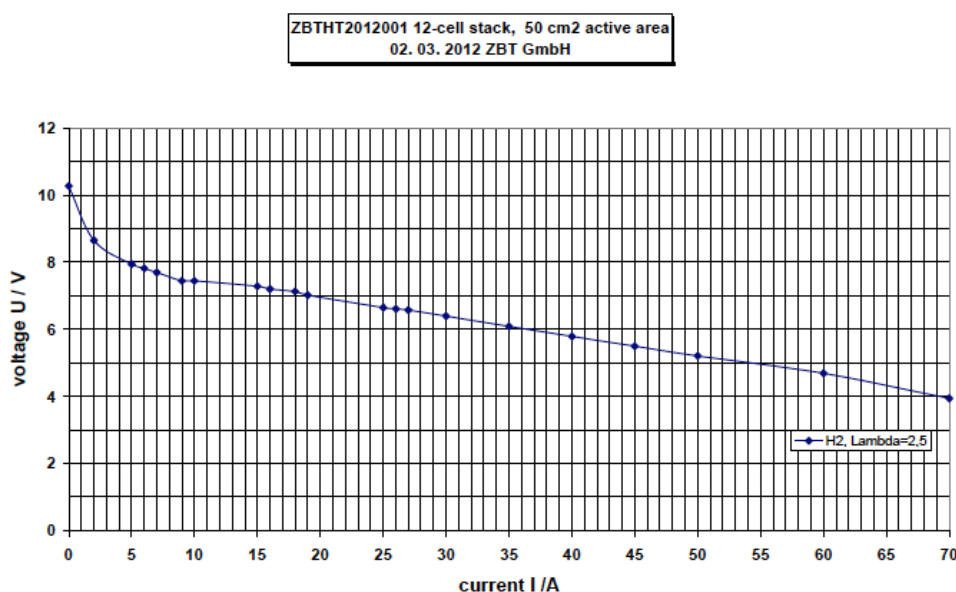


Figure 5: I-V curve of 12 cell fuel cell stack

4. Cálculos previos a los experimentos

4.1 Caudal volumétrico de aire de refrigeración necesario para trabajar a $I = 60A$ sin que la pila supere los $160^{\circ}C$

Propiedades

$$\rho_{aire}(25^{\circ}C) = 1,1846 \frac{Kg}{m^3}$$

$$Cp_{aire} = 1012 \frac{J}{Kg \cdot K}$$

Hipótesis:

- Se supone que un 10% del calor generado se pierde por las paredes laterales.
- Condiciones normales para el aire de entrada ($25^{\circ}C$; 1 atm)
- La temperatura del aire que sale de la carcasa que envuelve la pila es la misma que la de la pila $-160^{\circ}C$ -. Esto se traduce en suponer una capacidad de convección máxima ideal.

Comentar, que esta última hipótesis supone el caso más favorable, puesto que el aire no saldrá tan caliente y por ende, se requerirá de un mayor flujo.

Resolución

Queremos trabajar a una $I = 60A$ lo que implica un $U = 4,7 V$ -ver curva de polarización proporcionada por el fabricante ZBT-.

La pila tiene 12 celdas, así:

$$V_c = \frac{4,7}{12} = 0,39167 V \quad (\text{diferencia de potencial de cada celda})$$

$$P_e = I \cdot V = 60 \cdot 4,7 = 282 W \quad (\text{potencia eléctrica producida})$$

$$Q = P_e \left(\frac{1,25}{V_c} - 1 \right) = 282 \cdot \left(\frac{1,25}{0,39167} - 1 \right) = 617,99234 W \quad (\text{calor generado})$$

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T$$

$$(1 - 0,1) \cdot 617,99234 = \dot{m} \cdot 1012 \cdot (160 - 25) \rightarrow \dot{m} = 4,10353 \frac{g \text{ aire}}{s}$$

$$Q_{aire \text{ IN}} = 4,10353 \frac{g \text{ aire}}{s} \cdot \frac{1 Kg \text{ aire}}{1000 g \text{ aire}} \cdot \frac{1 m^3 \text{ aire}}{1,1846 Kg \text{ aire}} \cdot \frac{1000 l \text{ aire}}{1 m^3 \text{ aire}} \cdot \frac{60 s}{1 min} =$$

$$= 207,84383 \frac{l \text{ aire}}{min}$$

5. Experimentos

5.1 Razón de ser de los experimentos

El objetivo principal que se persigue es el de conocer el caudal de aire que circula por el interior de la HT-PEMFC por efecto del ventilador y desarrollar un modelo térmico de la pila con su sistema de refrigeración.

Para el primer objetivo –determinación del caudal de aire- nos ayudamos de dos experimentos de diferente índole. El primero de ellos consiste en la colocación de termopares en la entrada y la salida tanto del ventilador como de la pila, y en la parte inferior y superior de la aleta del medio del lado derecho –ver figura 15-. Dentro de este experimento se llevan a cabo tres ensayos, los cuáles serán definidos y ampliamente comentados posteriormente. El segundo experimento radica en el uso de un sensor de velocidad tanto en la entrada como en la salida de la carcasa que envuelve la pila para medir la velocidad del flujo de aire.

El ajuste de los parámetros del modelo térmico se hace a partir de la información extraída del primer experimento.

5.2 Calibración de los termopares

Para el calibrado de los siete termopares se usa una placa metálica donde engancharlos con la ayuda de una cinta de kapton. La idea es que toda la placa esté a la misma temperatura y es por eso que la escogemos de un material que sea buen conductor térmico.

La placa la sometemos a tres puntos de trabajo: punto frío, intermedio y caliente. Hay que controlar en la medida de lo posible que la temperatura en los tres puntos térmicos escogidos no varíe. Es por eso, que el punto frío se escoge a 0°C en una mezcla de agua líquida y hielo donde la teoría nos dice que se produce un cambio de estado pero no de temperatura. Tanto para el punto intermedio como caliente se emplea un calentador al que le podemos variar la temperatura del agua que posee.

Una vez hecho el montaje, ya solamente queda esperar a la recopilación de datos para posteriormente analizarlos.

Comentar que el calibrado de los termopares con sus gráficos y verificaciones pertinentes está disponible en el anexo II. Lo que se expone a continuación es la metodología empleada en la hoja de Excel y el calibrado de un termopar.

Lo primero que hay que hacer en el análisis de los datos, es escoger zonas de los tres puntos térmicos –que antes se comentaron- en las que la temperatura se haya mantenido lo más constante posible.

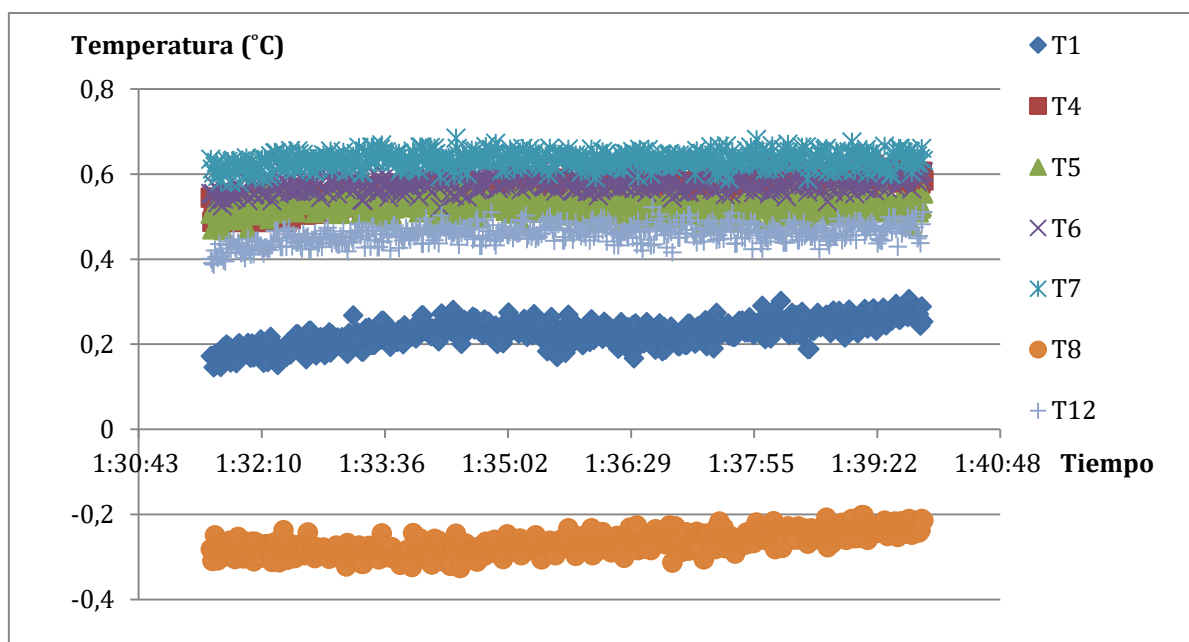


Figura 10 – Medición de los termopares en el punto frío.

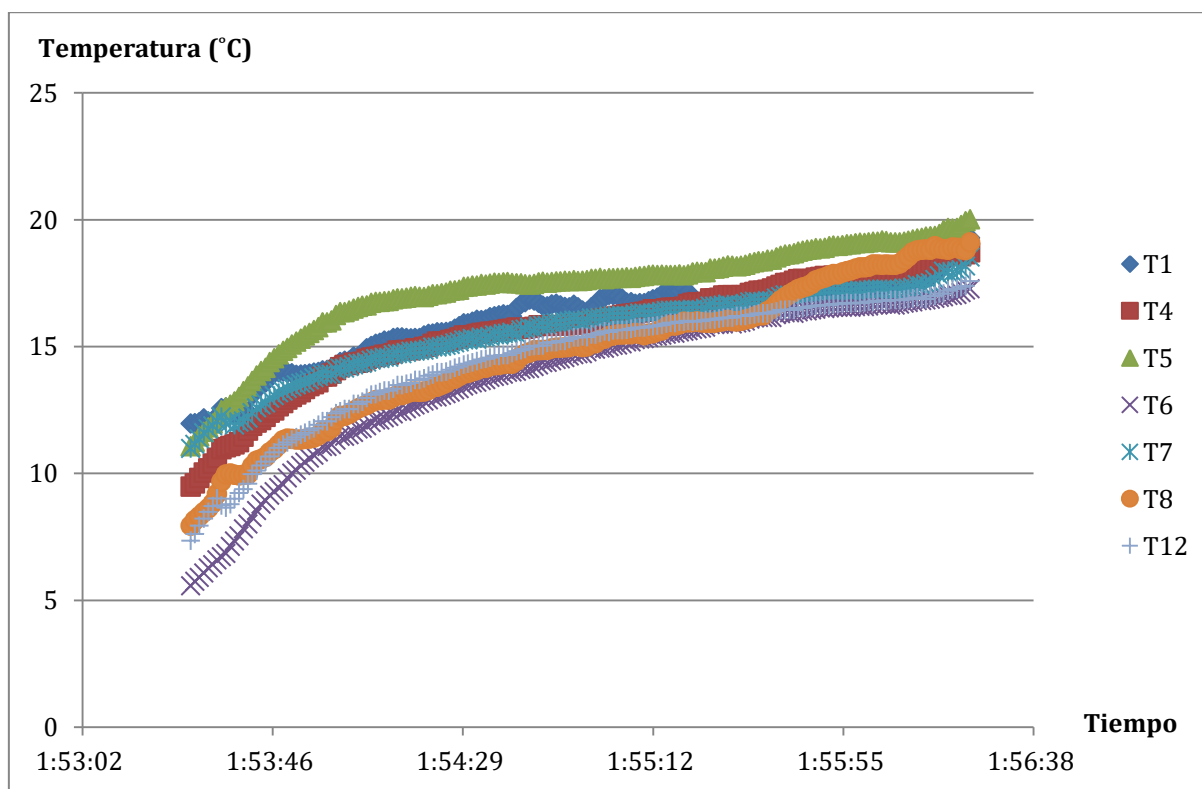


Figura 11 – Medición de los termopares en el punto intermedio

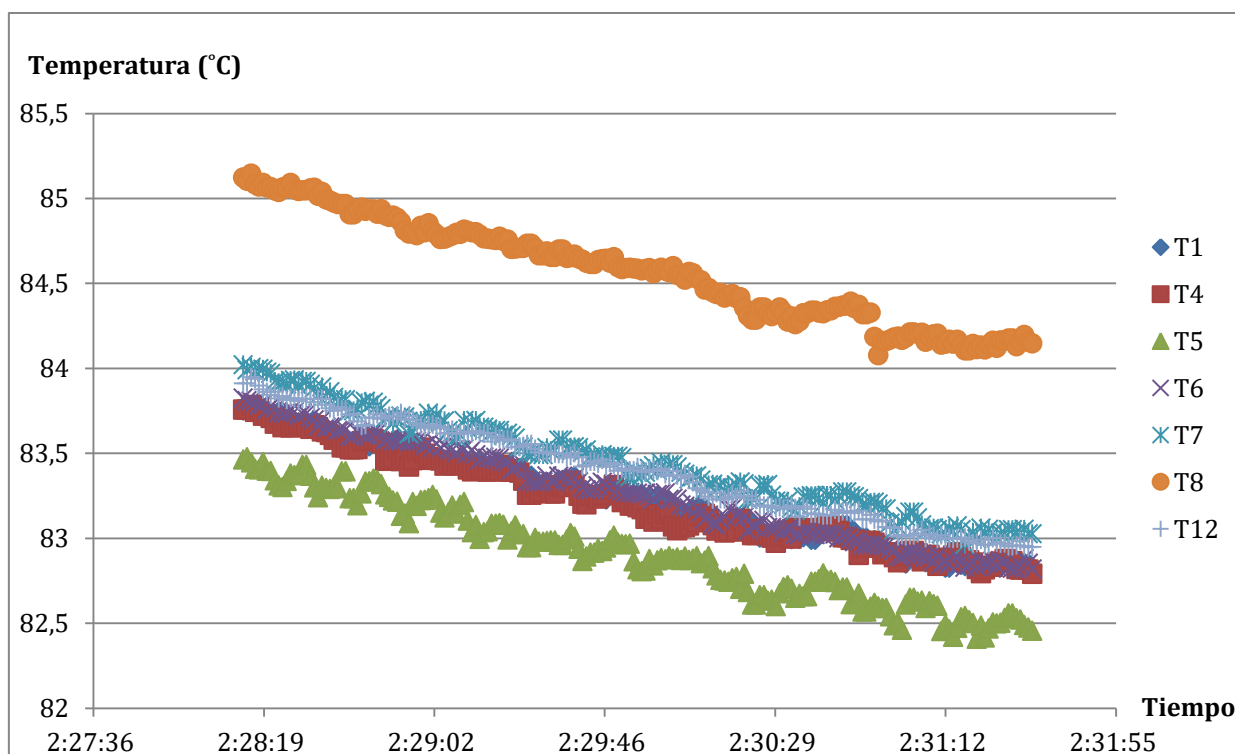


Figura 12 – Medición de los termopares en el punto caliente

Seguidamente lo que hay que hacer es escoger el/los termopares que van a actuar como referencia, y un valor concreto tanto para el punto frío, intermedio y caliente.

PUNTO	TIEMPO	T1	T4	T5	T6
FRÍO	1:39:00 PM	0,2694	0,5845	0,5135	0,5744
INTERMEDIO	1:55:30 PM	16,6802	17,0228	18,1860	15,8927
CALIENTE	2:29:46 PM	83,2274	83,2572	82,9464	83,3182
PUNTO	TIEMPO	T7	T8	T12	REF=AVERAGE (T4 Y T6)
FRÍO	1:39:00 PM	0,6272	-0,2598	0,4568	0,5688
INTERMEDIO	1:55:30 PM	16,5998	16,0083	16,1455	0,5802
CALIENTE	2:29:46 PM	83,4730	84,6458	83,4214	0,6040

Nota: Las unidades de los datos expuestos en esta tabla son °C.

Como bien se observa en la tabla, los termopares T4 y T6 son los que hacen de referencia.

Acto seguido, lo que se hace es un gráfico de dispersión de cada termopar con la referencia y se halla la ecuación de la línea de tendencia.

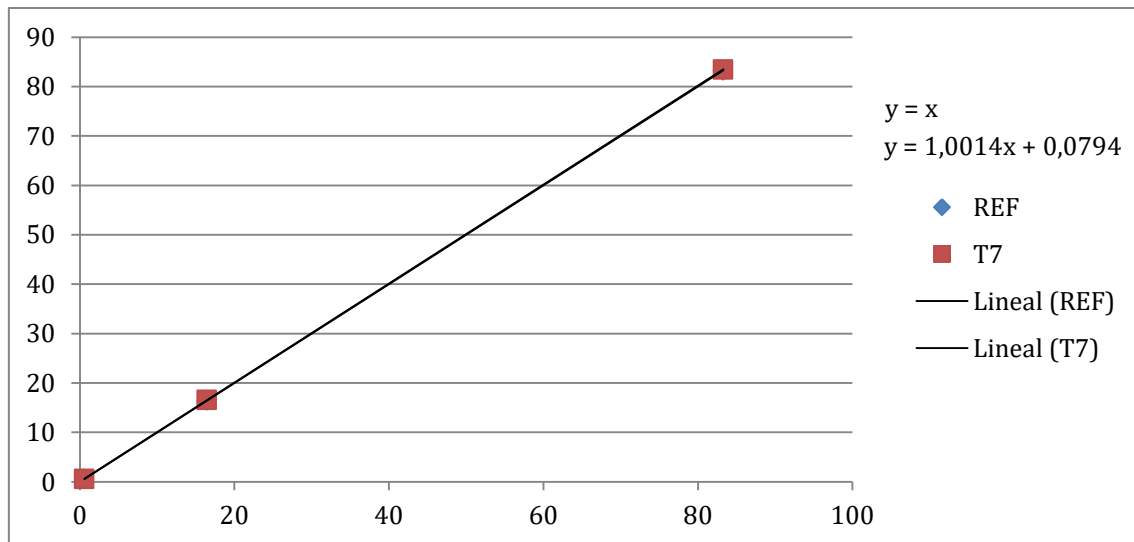


Figura 13 – Línea de tendencia del termopar T7

Con los valores de la ecuación de la línea de tendencia del termopar que no actúa como referencia, se corrigen los datos que nos proporciona éste para que la referencia y el termopar indiquen la misma temperatura. Si expresamos la línea de tendencia del termopar como $y = ax + b$, entonces la corrección es:

$$y_{\text{corregido}} = \frac{y - b}{a}$$

Ya por último sólo nos queda comprobar el ajuste:

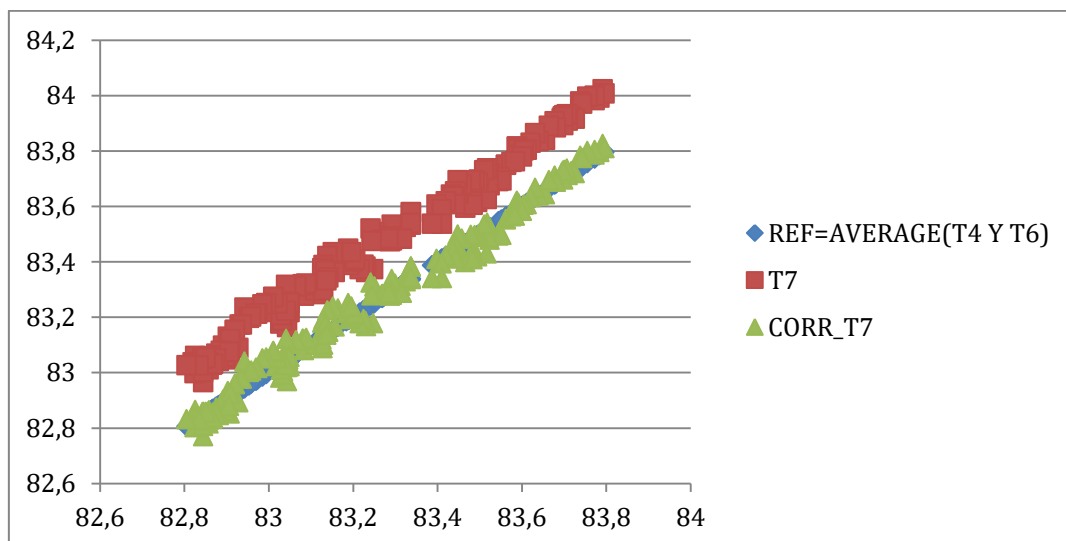


Figura 14 – Gráfico de los valores de la referencia y valores antiguos y corregidos del termopar 7 en el punto caliente

5.3 Experimento con los termopares

Distribución de los termopares

T1: Colocado a la salida del compresor de aire y antes de la resistencia calefactora

T4: En la zona de captación de aire del compresor (Temperatura ambiente)

T5: Salida de aire sobre las aletas de la pila (aprox. 1 cm encima) lado izquierdo.

T6: Salida de aire sobre las aletas de la pila (aprox. 1 cm encima) lado derecho.

T7: En la tercera aleta del lado derecho de la pila cara exterior y parte inferior.

T8: Tras la resistencia calefactora y antes de la pila.

T12: En la tercera aleta del lado derecho de la pila cara exterior y parte superior.

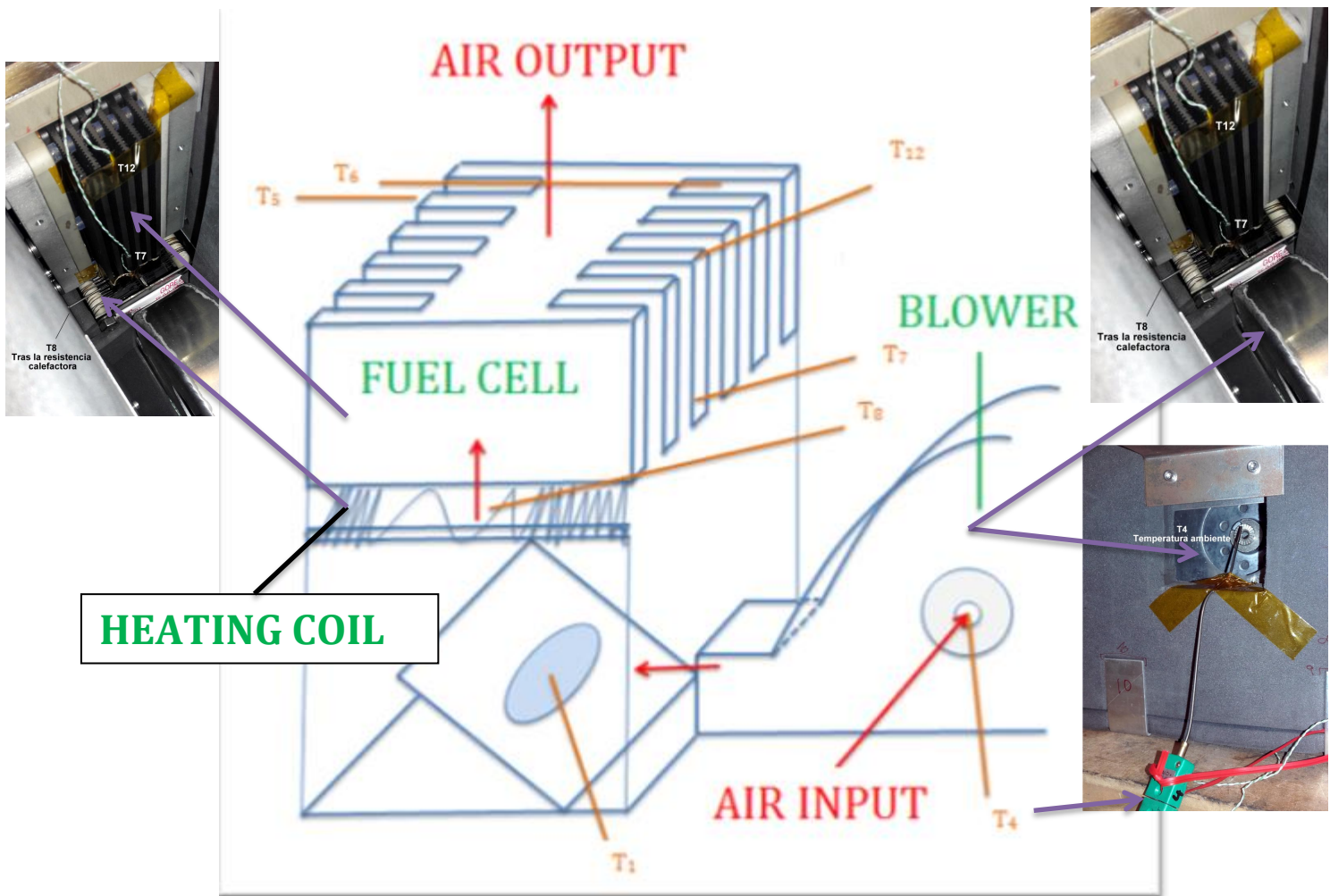


Figura 15 – Esquema de los componentes interiores de la carcasa que envuelve la HT-PEMFC

Esta distribución y numeración de los termopares es la misma para los tres ensayos.

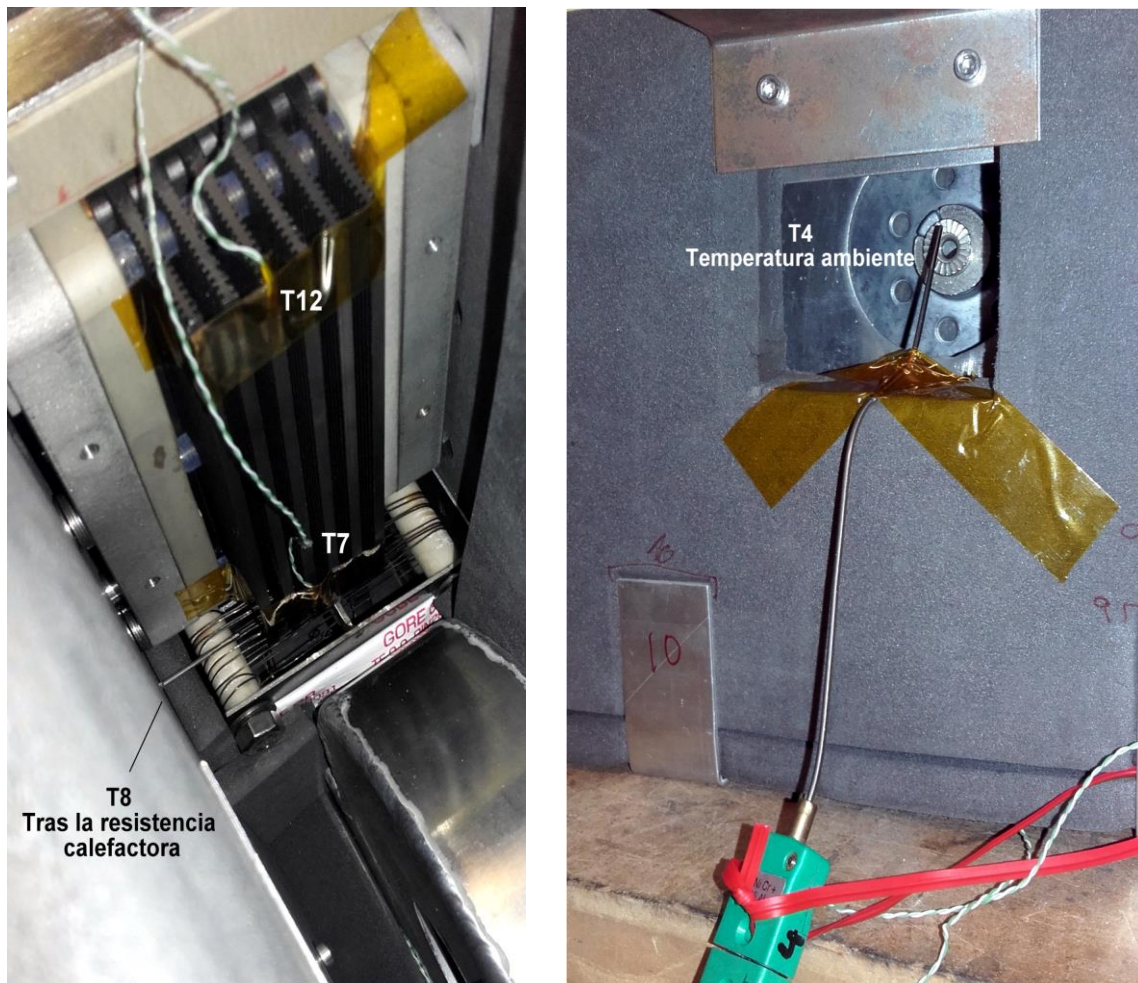


Figura 16a – Imagen real de la HT-PEMFC que muestra la colocación de los termopares

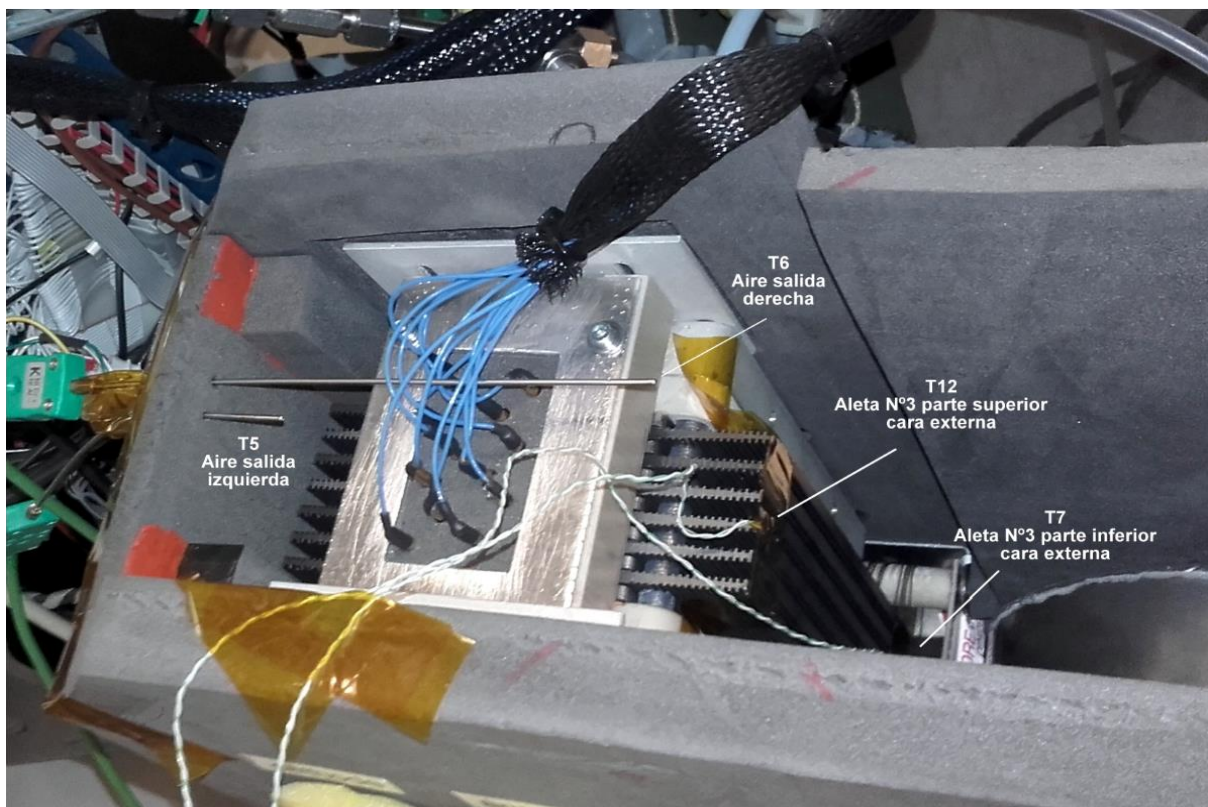
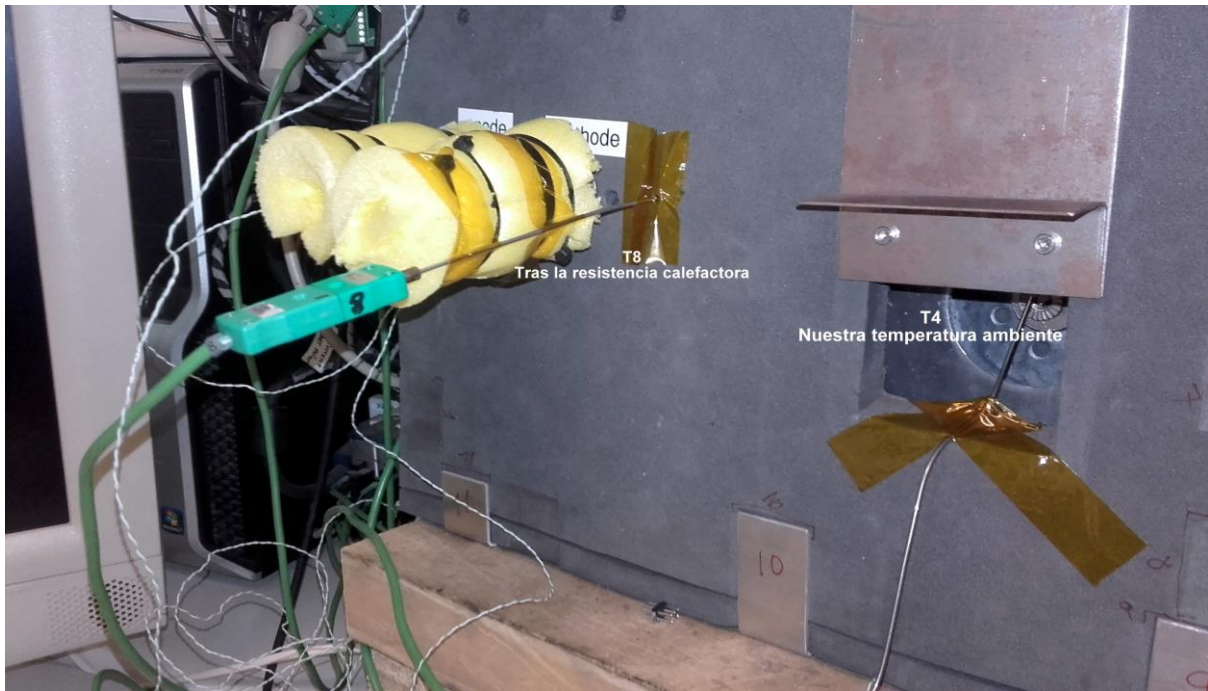


Figura 16b – Imagen real de la HT-PEMFC que muestra la colocación de los termopares

Este experimento –como ya se ha comentado anteriormente- sirve para la determinación del caudal de aire circulante por la pila y para la determinación de los parámetros del modelo dinámico implementado en MATLAB-Simulink del que se hablará en el siguiente capítulo. Para la consecución de tales objetivos, se requiere hacer tres ensayos, los cuales se definen y comentan a continuación:

ENSAYO 01

Este ensayo tiene por objetivo determinar el salto térmico que se produce antes y después del ventilador. Para ello, se pone en funcionamiento solamente el ventilador y se deja que las temperaturas se estabilicen.

Cronología

8:42:00h: Arranque del programa de adquisición de datos -punto 1-

8:50:00h: Conexión del ventilador -punto 2-

11:33:21h: El sistema llega al estado estacionario -punto 3-

11:50:00h: STOP -punto 4-

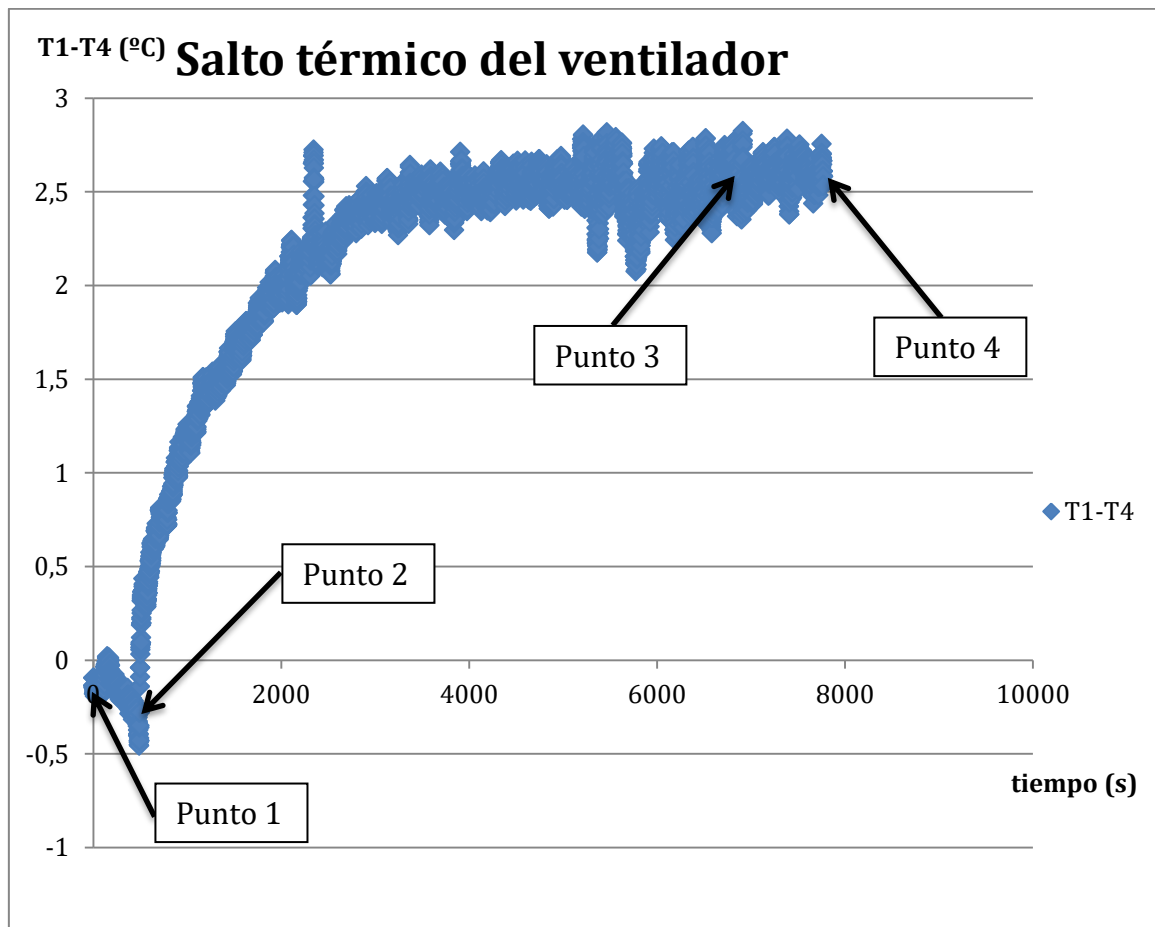


Figura 17 – Muestra la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del ventilador.

Observando la figura 17 podemos concluir que el sistema llega al estado estacionario en el instante 7000 (11:33:21h). Para extraer el valor del salto térmico, se hace el promedio entre el instante 7000 (11:33:21h) y el instante 8000 (11:50h). El valor obtenido es de $2,59^{\circ}C$.

En el ensayo 02 se comentará la motivación real que nos ha llevado a realizar este ensayo 01.

Todos los datos referentes a este ensayo se pueden encontrar en el documento Excel “*Ensayo01*” que es propiedad del laboratorio de Pilas de Combustible del IRI.

ENSAYO 02

Este ensayo se hace para hallar el valor del caudal de aire circulante por la pila y para determinar parámetros del modelo térmico.

Para nuestro primer objetivo –determinación del caudal de aire- se aplica la siguiente ley física $Q = \dot{m}C_p\Delta T$, de la que se halla el flujo másico, el cual se divide por la densidad para dar como resultado el caudal volumétrico de aire circulante. Para poder aplicar la ley física antes mencionada, se requiere saber el calor y la diferencia de temperatura entre dos puntos. Esto nos lleva hasta la resistencia, pues es el único elemento del que podemos llegar a conocer el calor generado. Es sabido que el calor generado por una resistencia es el producto de la intensidad por el voltaje. El delta de temperatura debe ser entonces entre la temperatura antes de la resistencia (T1) y después de la resistencia (T8).

Conscientes de que los termopares próximos a la resistencia van a ser afectados por la radiación, se decide que estos sean termopares de vaina. Con el mismo objetivo, se intenta protegerlos al máximo haciendo en la medida de lo posible que la resistencia no los vea para así evitar un error en la lectura de la temperatura del aire debido al efecto de la radiación. Siguiendo la misma filosofía de evitar el efecto de la radiación, se usa la lectura del termopar T4 y se le suma el salto térmico del ventilador encontrado en el ensayo 01 en vez de utilizar la lectura del termopar T1. Este es el motivo por el cual se hace el ensayo 01.

El segundo objetivo –determinación de parámetros del modelo teórico- requiere disponer de las curvas de calentamiento de la pila y del aire que circula por el interior de la carcasa. Los parámetros se determinan a partir de las estáticas y dinámicas de estas curvas. En el siguiente capítulo, se hablará en profundidad sobre este tema y se mostrarán los cálculos que hay que seguir para su determinación.

Para poder cumplir los objetivos antes expuestos, en este ensayo se hace uso de la resistencia y del ventilador.

El proceso que se sigue para la puesta en marcha de este ensayo es muy sencillo. Se tiene que arrancar el programa de adquisición de datos y alimentar tanto el ventilador como la resistencia. Una vez ya se ha puesto en marcha el ensayo, solo hace falta esperar -4h aprox.- a que las curvas lleguen al estado estacionario.

En este ensayo se alimenta la resistencia a 30V. La intensidad medida es de 3,7A por lo que la potencia térmica que está dando es de 111W ($P = I \cdot V$).

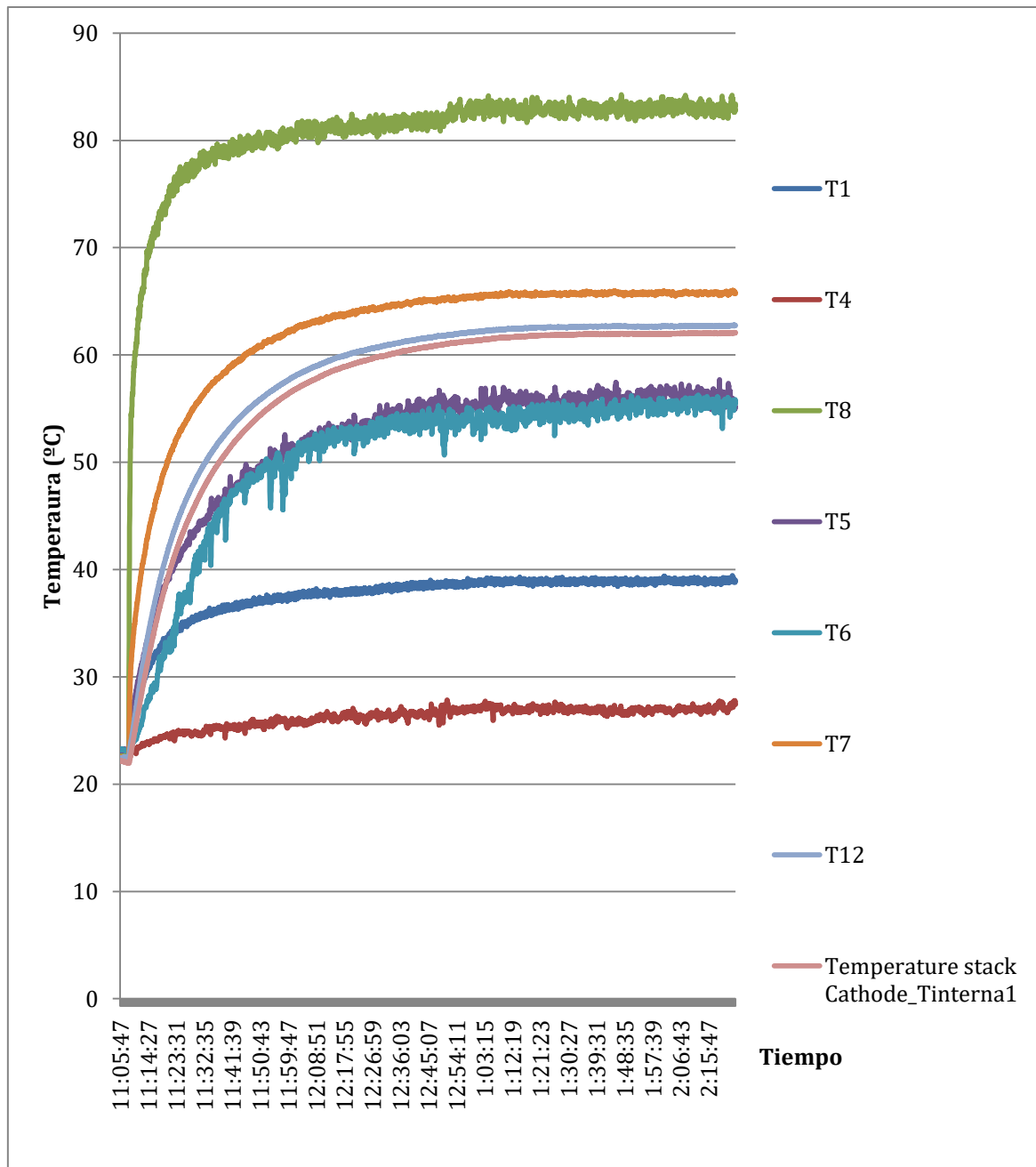


Figura 18 - Curvas de calentamiento

Temperaturas en estado estacionario

T1	T4	T5	T6	T7	T8	T12	T_interna
38,9886	27,4298	55,0572	55,4616	65,7692	83,2558	62,7499	62,0645

Las medidas obtenidas son:

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{Q}{c_p \cdot (T_8 - (T_4 + \text{salto térmico } R))} = \frac{111}{1012 \cdot (83,26 - (27,43 + 2,59))} = 2,06 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\text{caudal} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{2,06 \cdot 10^{-3}}{1,18} = 1,74 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 104,75 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Todos los datos referentes a este ensayo se pueden encontrar en el documento Excel “*Ensayo02*” que es propiedad del laboratorio de Pilas de Combustible del IRI.

ENSAYO 03

Este ensayo es exactamente igual al ensayo 02 con la excepción de que la resistencia ahora se alimenta a 20V. La intensidad medida es de 2,42A por lo que la potencia térmica que está dando es de 48,4W ($P = I \cdot V$). Asimismo, los objetivos que persigue este ensayo son idénticos a los del ensayo 02.

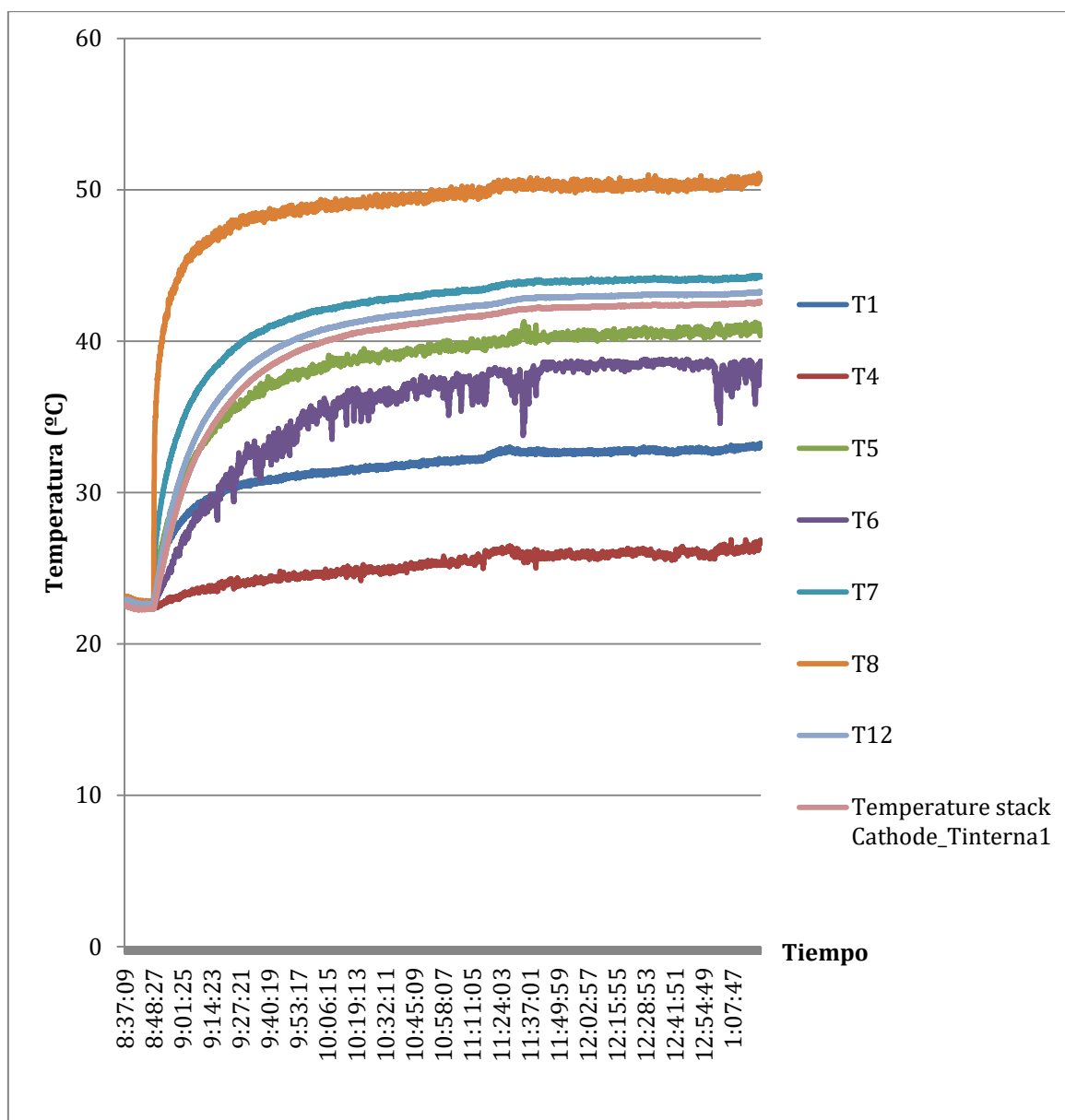


Figura 19 – Curvas de calentamiento

Temperaturas en estado estacionario

T1	T4	T5	T6	T7	T8	T12	T_interna
33,0854	26,7888	40,7401	38,5093	44,2830	50,7956	43,2232	42,5620

Las medidas obtenidas son:

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \Delta T} = \frac{Q}{c_p \cdot (T_8 - (T_4 + \text{salto térmico } R))} = \frac{48,4}{1012 \cdot (50,79 - (26,79 + 2,59))} = 2,23 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\text{caudal} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{2,23 \cdot 10^{-3}}{1,18} = 1,89 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 113,58 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Todos los datos referentes a este ensayo se pueden encontrar en el documento Excel "Ensayo03".

5.4 Experimento con el sensor de velocidad de aire

Para llevar a cabo este experimento se emplea un sensor de velocidad el cual mide la velocidad del aire en un punto en concreto. Además se hace uso de los tubos de cartón que se muestran en la figura 20, y que tienen por objetivo que todo el flujo de aire circule a través suyo. Otro elemento importante es la rejilla que se encarga de uniformizar el flujo. Una vez hecho todo el montaje, se pone en marcha el ventilador y se lee la medida dada por el sensor de velocidad.

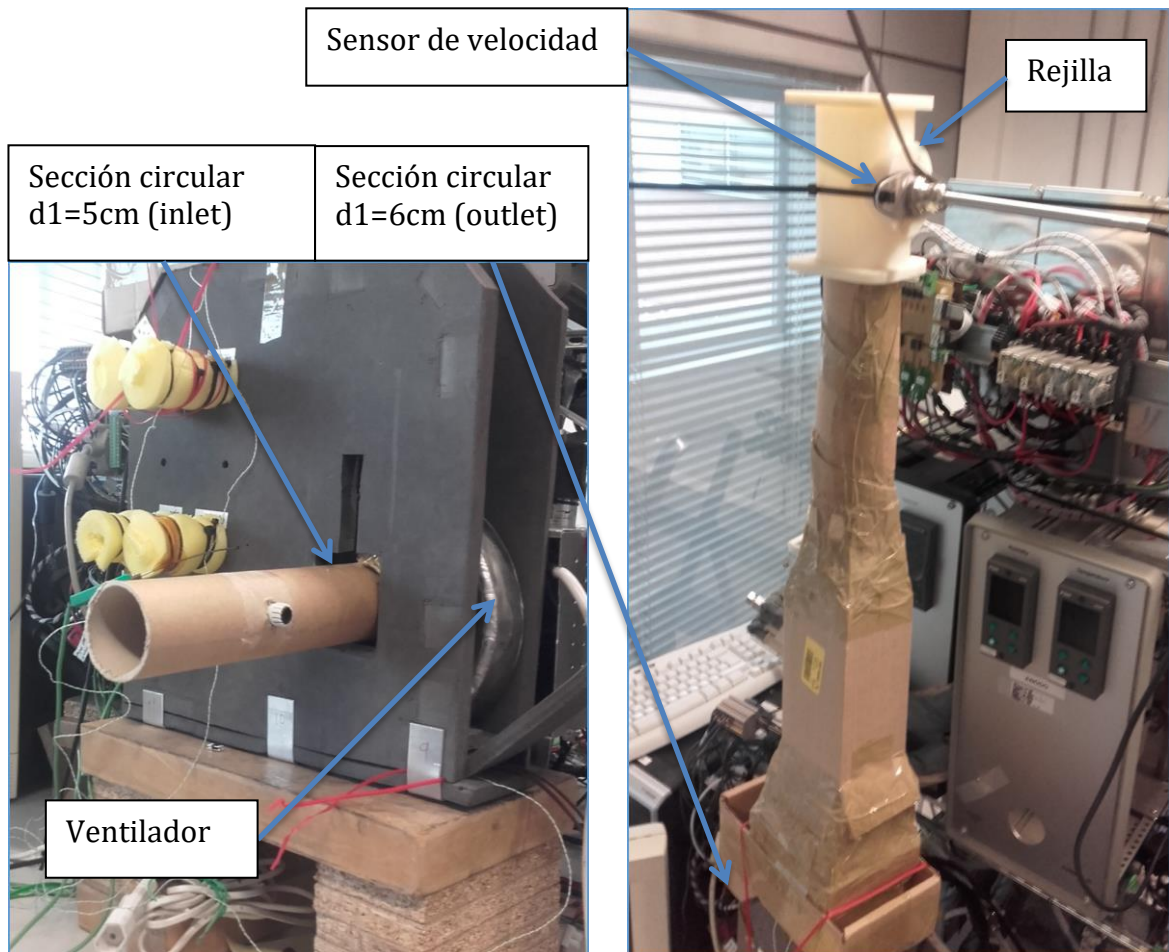


Figura 20 – Montaje para la colocación del sensor de velocidad

El montaje se hace de tal forma que se pueda considerar flujo uniforme tanto en la entrada como en la salida. Así pues, si se considera flujo uniforme, se puede usar la fórmula: caudal=área·velocidad.

Las medidas obtenidas, teniendo en cuenta que el orificio es circular, son:

$$Caudal_{inlet} = V_1 \pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 = 1,69 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,05}{2} \right)^2 = 199,09 \text{ L/min}$$

$$Caudal_{outlet} = V_2 \pi \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 = 0,43 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,06}{2} \right)^2 = 72,95 \text{ L/min}$$

5.5 Resultados

Experimento con los termopares:

Ensayo 02: Temperaturas en estado estacionario:

T1	T4	T5	T6	T7	T8	T12	T_cathode
38,9886	27,4298	55,0572	55,4616	65,7692	83,2558	62,7499	62,0645

Ensayo 03: Temperaturas en estado estacionario:

T1	T4	T5	T6	T7	T8	T12	T_cathode
33,0854	26,7888	40,7401	38,5093	44,2830	50,7956	43,2232	42,5620

			Voltaje aplicado (V)	Velocidad medida (m/s)	Caudal de aire (L/min)
EXPERIMENTO	Termopares	Ensayo 02	30	--	104,75
		Ensayo 03	20	--	113,58
	Sensor de velocidad	Entrada	--	1,69	199,09
		Salida	--	0,43	72,95

Figura 21 – Tabla resumen de los experimentos

La Figura 21 pone de relieve que los valores de caudal de aire obtenidos mediante el experimento de los termopares distan mucho de aquellos hallados con la ayuda del sensor de velocidad. Además, los valores dentro del mismo experimento del sensor de velocidad son muy dispares. La explicación sobre qué valor parece el más fiable y el porqué se han obtenido valores tan diferentes se expone a continuación.

Para responder a la pregunta de por qué se obtienen valores tan diferentes entre ambos experimentos y entre valores del segundo experimento, vamos a recordar las hipótesis que se asumieron y vamos a mencionar las posibles causas del falseo de resultados.

En el primer experimento se halló el caudal mediante la ayuda de termopares. ¿Qué riesgos había entonces de que algo nos falseará los resultados? Pues, que la lectura mostrada por pantalla de los termopares fuera incorrecta debido bien a que éstos no estuvieran calibrados o bien por el propio error de medida del aparato. Además, para la medición del caudal de aire se requería de los termopares de antes y después de la resistencia lo que suponía otro peligro al estar éstos expuestos a la radiación de la resistencia. ¿Qué se hizo entonces para evitar todos estos riesgos? Por un lado, calibrar los termopares tal y como se expuso en el apartado “5.2 Calibración de los termopares”. Y por otro lado, con el fin de evitar el efecto de la radiación, sustituir la lectura del termopar de antes de la resistencia por la suma entre el termopar que medía el ambiente y el salto térmico del ventilador. Con el mismo objetivo, se intentó –en la medida de lo posible- que la resistencia no viera el termopar de después de ésta.

Por lo expuesto anteriormente, parece coherente pensar que los resultados obtenidos a partir del experimento 1 son bastante fiables. De hecho, que los caudales de los ensayos 02 y 03 no den exactamente iguales es lógico, puesto que para su cálculo hemos supuesto una densidad de aire constante de valor $1,18 \text{ Kg/m}^3$ que es la que tiene el aire a 25°C .

El segundo experimento –sensor de velocidad- presenta valores muy diferentes a los obtenidos en el primero y entre el caudal de entrada y de salida. La explicación a esto puede deberse a distintos motivos los cuales se comentan a continuación.

La rejilla utilizada puede que no desempeñara del todo bien su función de uniformizar el flujo, por lo que la hipótesis de flujo uniforme sería inválida, y estaríamos cometiendo en consecuencia un error de cálculo.

El caudal medido en la salida es mucho menor que el de la entrada. Esto nos hace pensar en la existencia de fugas de aire.

La precisión del aparato de medida puede no ser del todo buena en la región de trabajo en la que nos encontramos –velocidades bajas-.

Por los argumentos desarrollados arriba y por lo dispares que son los resultados obtenidos dentro de este mismo experimento, éste no nos genera demasiada confianza y se decide no tener en cuenta las conclusiones del mismo.

El valor del caudal de aire, que se usará en el modelo dinámico de la pila implementado en Simulink, es el que resulte de la media aritmética entre los valores de los ensayos 02 y 03 del experimento 1.

6. Modelo dinámico en Simulink -MATLAB-

6.1 Modelo matemático

El modelo dinámico implementado en Simulink -MATLAB- modela el comportamiento térmico de la pila de combustible. Los parámetros y variables que intervendrán en el modelo se muestran en la figura 22.

Parámetros y variables	Unidades	Definición
C_{pa}	$J/(KgK)$	Calor específico del aire
hA	$W/(m^2K)*m^2$	Producto entre el coeficiente de convección y el área de contacto de la pila con el aire
I_p	A	Intensidad de la pila
I_r	A	Intensidad de la resistencia
k	W/K	Constante de pérdidas
\dot{m}_a	Kg/s	Flujo másico de aire
$m_p C_p$	$[Kg/s]*[J/(KgK)]$	Producto entre la masa y el calor específico de la pila
T	K	Temperatura de la pila
$T_{ambiente}$	K	Temperatura ambiente del aire
T_{al}	K	Temperatura del aire entrante
T_{aF}	K	Temperatura del aire saliente
V_c	V	Diferencia de potencial de cada celda
V_p	V	Voltaje de la pila
V_r	V	Voltaje de la resistencia

Figura 22 – Tabla de parámetros y variables que intervienen en el modelo

Para llevar a cabo el modelo primeramente se tienen que conocer los calores que intervienen en el sistema, los cuales se muestran en la figura 23.

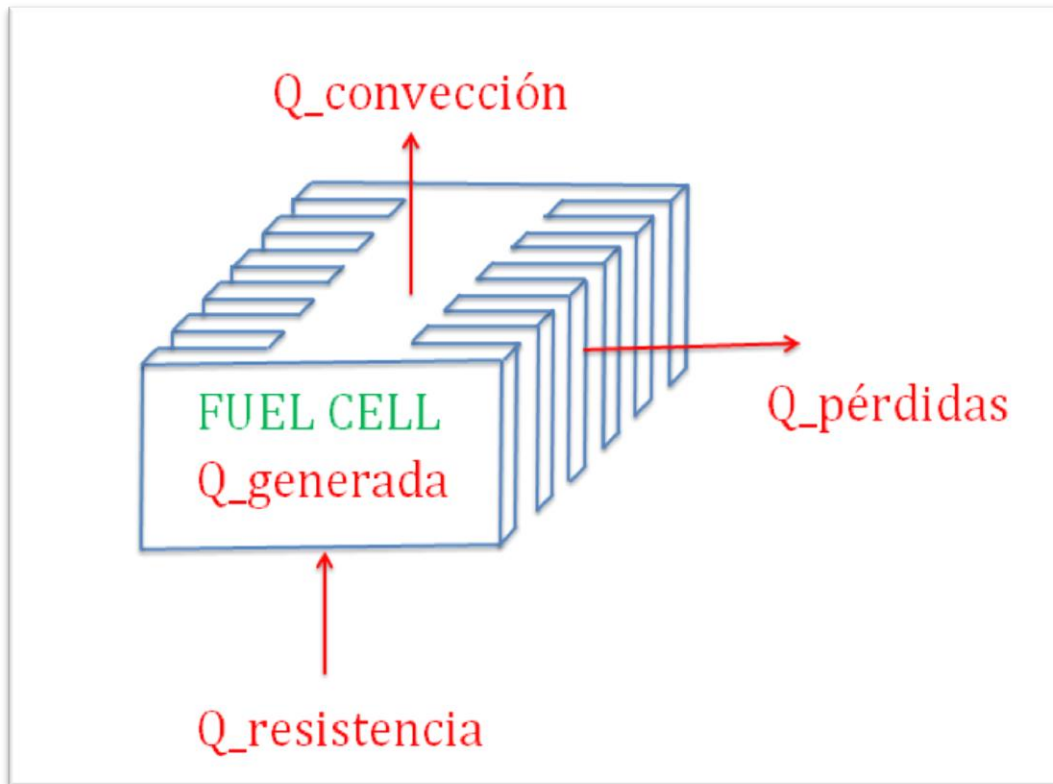


Figura 23 – Balance térmico de la HT-PEMFC

Para la realización del modelo se han llevado a cabo una serie de suposiciones, las cuales se exponen a continuación:

Hipótesis

- Temperatura uniforme de la pila.
- Diferencia de temperaturas efectiva entre el aire y la pila: MLDT (diferencia de temperatura media logarítmica).
- Coeficiente de convección constante durante la simulación.

Una vez se tiene claro qué calores afectan a nuestro sistema, y teniendo bien presentes las hipótesis, se procede a escribir la ecuación matemática de la variación de la temperatura de la pila, T , con el tiempo:

$$m_p C_p \frac{dT}{dt} = \underset{\text{por la pila}}{Q_{\text{generada}}} + Q_{\text{resistencia}} - Q_{\text{convección}} - Q_{\text{pérdidas}} \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Desarrollando cada potencia, se tiene:

$$m_p C_p \frac{dT}{dt} = I_p V_p \left(\frac{1,25}{V_c} - 1 \right) + I_R V_R - hA\Delta T_{ml} - k(T - T_{\text{ambiente}}) \quad [\text{Ecuación 6}]$$

Siendo ΔT_{ml} :

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_{aF} - T_{aI}}{\ln\left(\frac{T - T_{aI}}{T - T_{aF}}\right)} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

$$T_{aI} = T_{\text{ambiente}} + \text{salto térmico del ventilador} \quad [\text{Ecuación 8}]$$

$$T_{aF} = T + (T_{aI} - T) \cdot \exp\left(\frac{-hA}{m_p C_p}\right) \quad [\text{Ecuación 9}]$$

Comentar que la ecuación anterior -Ecuación 6- no es la que se ha acabado implementando en Simulink. El producto $I_R V_R - Q_{\text{resistencia}}$ se eliminó como calor que afecta directamente a la pila, y lo que se hizo fue tener en cuenta este calor $-Q_{\text{resistencia}}$ en la temperatura del aire de entrada de la pila que es lo que sucede en la realidad. Así pues, el modelo final nos queda:

$$m_p C_p \frac{dT}{dt} = Q_{\text{generada por la pila}} + \cancel{Q_{\text{resistencia}}} - Q_{\text{convección}} - Q_{\text{pérdidas}} \quad [\text{Ecuación 10}]$$

$$m_p C_p \frac{dT}{dt} = I_p V_p \left(\frac{1,25}{V_c} - 1\right) + \cancel{I_R V_R} - hA\Delta T_{ml} - k(T - T_{\text{ambiente}}) \quad [\text{Ecuación 11}]$$

Siendo ΔT_{ml} :

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_{aF} - T_{aI}}{\ln\left(\frac{T - T_{aI}}{T - T_{aF}}\right)} \quad [\text{Ecuación 12}]$$

$$T_{aI} = T_{\text{ambiente}} + \text{salto térmico del ventilador} + \Delta T \quad [\text{Ecuación 13}]$$

Siendo ΔT :

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{resistencia}}}{\dot{m}_a C_{pa}} \quad [\text{Ecuación 14}]$$

$$T_{aF} = T + (T_{aI} - T) \cdot \exp\left(\frac{-hA}{m_p C_p}\right) \quad [\text{Ecuación 15}] \text{ -ver anexo III-}$$

6.2 Implementación en MATLAB-Simulink

El modelo incorpora una dinámica en forma de sistema de 1^{er} orden con el fin de mejorar la simulación del calentamiento del aire de entrada de la pila debido a la resistencia. Este sistema de 1^{er} orden tiene ganancia 1 y su función es atribuir una dinámica a la curva de calentamiento del aire de entrada de la pila. Sin esta dinámica, el aire -durante la simulación- se calentaría de forma instantánea, lo cual no sucede como bien se puede apreciar en los datos de los ensayos 02 y 03 del experimento 1 -ver fichero Ensayo02.xls y Ensayo03.xls-.

Según el fabricante, para poder encender la pila, ésta debe de estar a una temperatura igual o mayor de 140°C. La resistencia, por su parte, debe apagarse

cuando la temperatura de la pila esté por encima de la temperatura de encendido. Otra condición que impone el fabricante es la de abrir ventanas cuando la intensidad de la pila supere los 18A.

Los requerimientos del fabricante -antes expuestos- se incorporaron al modelo haciendo uso de diferentes switch, los cuales se pueden ver en la figura 25.

La pila HT-PEMFC del laboratorio, dispone de un relé que abre y cierra el circuito de la resistencia –ver figura 24-. Si la salida del comparador -integrado dentro del relé- es positiva (SET POINT>READING) entonces se cierra el circuito; si es negativa (SET POINT<READING) se abre.

Para conseguir, en el modelo dinámico implementado en Simulink-MATLAB, lo expuesto en el párrafo anterior se ha usado también un relé.

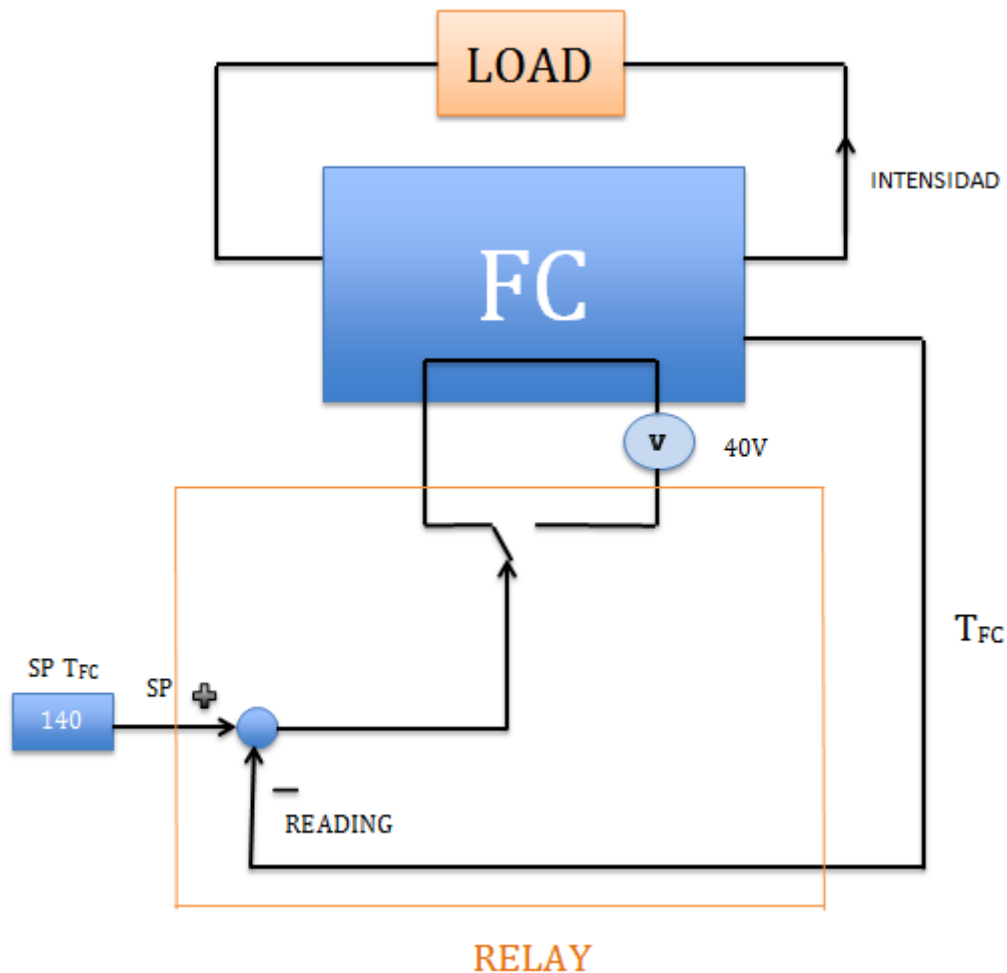


Figura 24 – Esquema del funcionamiento del encendido y apagado de la resistencia

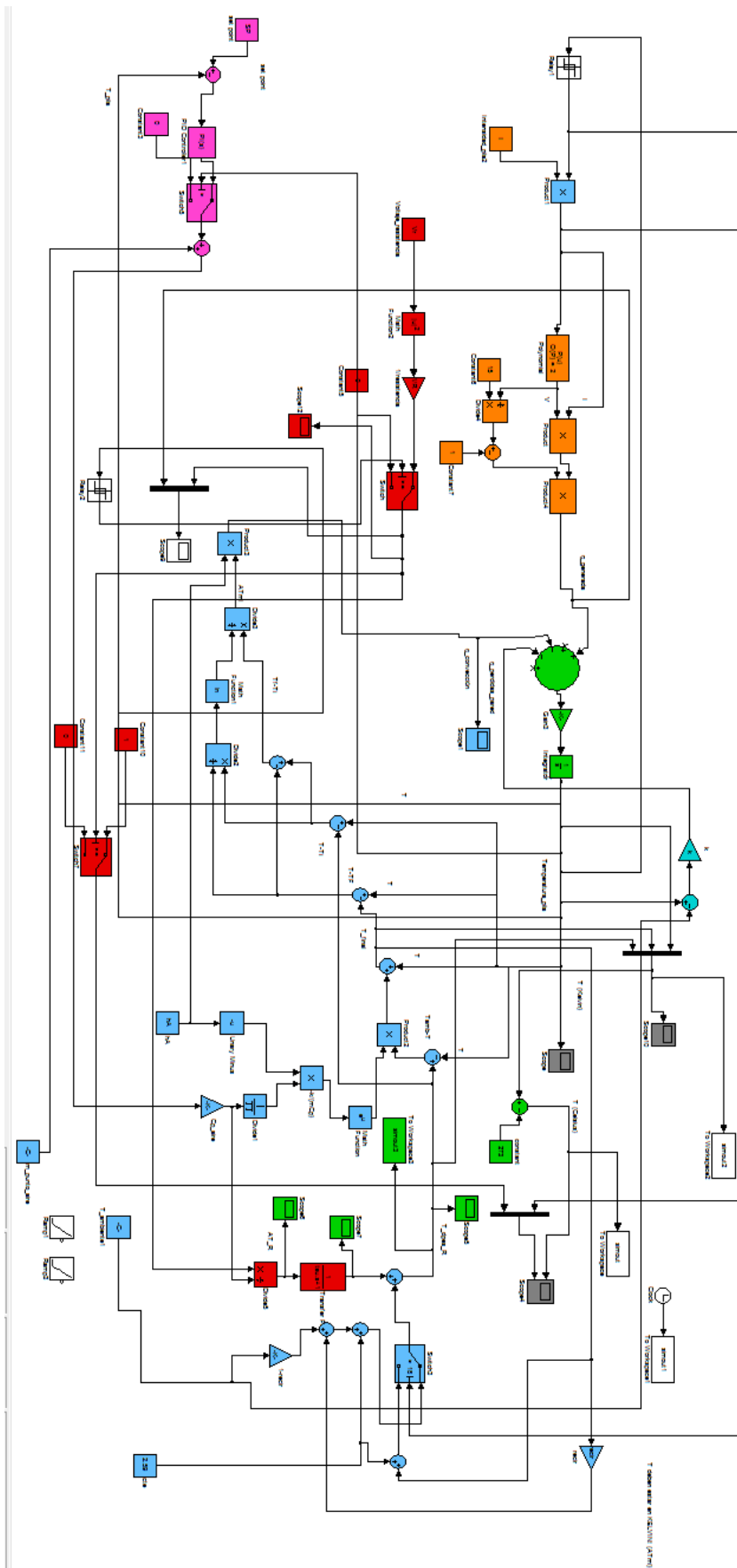
De modo general, comentar que:

- Se ha hecho uso de diversos multiplexores -MUX- para poder ver diferentes salidas de variables en un mismo gráfico.
- Para graficar se han utilizado osciloscopios -*scope*-.

Llegados a este punto, podemos decir que el modelo ya está completo a falta de la incorporación de un sistema de control.

Para el control de temperatura de la pila, se ha usado un controlador proporcional con un valor de $K_p=3E-6$, que tiene por función regular la temperatura de la pila según el *set point*.

Figura 25 – Esquema del modelo en MATLAB-simulink



6.3 Ajuste de parámetros

En los dos apartados anteriores de este capítulo 6, se ha hablado de las ecuaciones que rigen el comportamiento térmico de nuestro sistema y de su implementación en Simulink-MATLAB.

En este apartado, se expondrá la metodología que se ha seguido para la determinación de los parámetros.

El *Script* de Simulink-MATLAB con los parámetros a ajustar, algunas constantes susceptibles de ser cambiadas y los valores iniciales de los estados se muestran en la figura 26.

```

1 %Simulación a 24A
2
3 xInitial=[414.62 0 0] %iniciación de variables [T_stack sist_1_orden P]
4
5 Cp_aire=1012 %J/(Kg*K) calor especifico del aire
6 mCp=2800 %m(Kg)*Cp[J/Kg*K] masa de la pila por su calor especifico
7 R=8.108 %ohm resistencia del serpentín calentador
8
9 I=24 %A intensidad de la pila
10
11 Vr=40 %V voltaje del serpentín calentador
12 T_ambiente=301 %K temperatura ambiente
13 tau=120 %s constante de tiempo del sistema de primer orden
14
15 k=0.9 %W/K constante de pérdidas por las paredes
16
17
18 m_punto_aire=2.145e-3 %Kg/s flujo másico de aire que sale del ventilador
19 hA=22.4*0.11916 %h[W/m^2*K]*A[m^2] coef. de convección por el área total
20
21 recir=0.1 %recirculación expresada en tanto por uno
22
23 SP=160+273 %K set point de la temperatura de la pila

```

Figura 26 – *Script* de Matlab con los parámetros, variables y constantes del modelo dinámico.

Asumiendo que el porcentaje de aire que se recircula en caso de mantener las ventanas abiertas es de un 10%, los parámetros de la tabla anterior marcados en color lila son desconocidos. A continuación se presenta la justificación de cómo éstos han sido determinados:

Flujo másico de aire que sale del ventilador (m punto aire)

De las conclusiones extraídas en el apartado “5.5 Resultados”, se desprende que el flujo másico que circula por la pila se calcula como la media aritmética entre el valor encontrado en el ensayo 02 (experimento 1) y el ensayo 03 (experimento 1):

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_{\text{ensayo 02}} + \dot{m}_{\text{ensayo 03}}}{2} = \frac{2,06 \cdot 10^{-3} + 2,23 \cdot 10^{-3}}{2} = 2,145 \cdot 10^{-3} \frac{Kg}{s}$$

Área total:

Separación entre aletas=0,4cm

Altura aleta=12cm

Anchura aleta=3,5cm

Grosor aleta=0,3cm

Número de aletas=13

$$\text{Superficie con aletas} = 13 \cdot [(12 \cdot 3,5) \cdot 2 + 0,3 \cdot 12] = 1138,8 \text{cm}^2 = 0,11388 \text{m}^2$$

$$\text{Superficie sin aletas} = (12 \cdot 0,4) \cdot 11 = 52,8 \text{cm}^2 = 0,00528 \text{m}^2$$

$$\text{Área total} = \text{Superficie con aletas} + \text{Superficie sin aletas} = 0,11916 \text{m}^2$$

Constante de tiempo del sistema de primer orden (tau)

La constante de tiempo, del sistema de primer orden implementado en el modelo dinámico, tiene como función dar una cierta dinámica al calentamiento del aire que entra en la *Fuel Cell*.

Esta constante de tiempo - τ - depende de la potencia a la que alimentamos el serpentín calefactor.

Desafortunadamente, no se disponen de datos que permitan obtener la curva de calentamiento del aire de entrada a la pila cuando el voltaje de la resistencia es de 40V. La única información que tenemos es cuando se alimenta a 30 y 20 voltios – ver fichero Excel “Ensayo02” y “Ensayo03”-.

Comentar que la constante de tiempo - τ - es el tiempo que tarda un sistema de primer orden en llegar al 63% de su valor final.

Resultados de la constante de tiempo - τ -

	Ensayo 02	Ensayo 03
Voltaje serpentín calefactor (V)	30	20
Resistencia serpentín calefactor (ohm)	8,108	8,108
Potencia serpentín calefactor (W)	111,0	49,3
Temperatura inicial (°C)	22,59	22,83
Temperatura final (°C)	83,25	50,79
63% del valor final	60,8	40,44
Hora inicial	11:08:05h	8:48:25h
Hora 63% del valor final	11:10:29h	8:52:33h
τ (s)	144	248

Sin poder dar una justificación razonada, se toma un valor de τ de 120 segundos cuando el serpentín calefactor se alimenta a 40V.

Coeficiente de convección del aire (h), k de pérdidas y mCp (masa de la pila por su calor específico)

Antes de empezar a describir el proceso que se ha seguido para la determinación del coeficiente de convección, la k de pérdidas y mCp, es conveniente definir estos conceptos para saber si tiene sentido considerarlos como valores constantes o si por el contrario sería más sensato tomarlos como parámetros que varían en función del punto de trabajo de la pila.

Coeficiente de convección

El coeficiente de convección -h- no es un parámetro fijo, sino que depende de distintas variables como la geometría por donde circula el fluido, el estado de las superficies, las propiedades del flujo, la temperatura, la velocidad del fluido, el tipo de flujo... Además, el coeficiente de convección no es uniforme en toda la superficie, y lo que se conoce como h es en realidad un valor promedio en la superficie. Así pues, el parámetro h es muy complejo.

Por lo expuesto en el párrafo anterior, lo más razonable parece ser considerar un coeficiente de convección variable en función de la intensidad de la pila.

Por otra parte, debido a que la geometría de las aletas de la pila por donde circula el aire es más bien compleja, a que existen gradientes de temperatura en las aletas tanto horizontalmente como verticalmente, y al hecho de desconocer el desgaste de éstas, se descarta el cálculo analítico del coeficiente de convección y se opta por encontrarlo de forma empírica. Este valor h encontrado será, en realidad, un valor promedio en la superficie.

K de pérdidas

El parámetro k interviene en la ecuación $\dot{Q}_{p\acute{e}rdidas} = K \cdot (T_{stack} - T_{ambiente})$, que representa la potencia que pierde la *Fuel Cell* lateralmente y que posteriormente se pierde por las paredes.

Para entender el significado de la ecuación anterior, debemos dirigirnos a la primera ley de Fourier aplicada en una pared plana:

$$\dot{Q} = \frac{(T_{interior\ de\ la\ pared} - T_{exterior\ de\ la\ pared})}{\frac{longitud\ de\ la\ pared}{conductividad\ del\ material \cdot \acute{a}rea}}$$

Haciendo una equivalencia eléctrica en la ecuación de arriba, se tiene que la potencia es equivalente a la intensidad, la diferencia de temperaturas a la diferencia de potencial y el término que nos queda es equivalente a la resistencia.

Si sustituimos, en la ecuación de arriba, el término que divide a la diferencia de temperaturas por una resistencia a la que llamamos R, se tiene:

$$\dot{Q} = \frac{(T_{interior\ de\ la\ pared} - T_{exterior\ de\ la\ pared})}{R}$$

Sabiendo que la resistividad -R- es la inversa de la conductividad -k-, podemos escribir:

$$\dot{Q} = k \cdot (T_{interior\ de\ la\ pared} - T_{exterior\ de\ la\ pared})$$

Este flujo de calor, definido por la ecuación anterior, es el que realmente se pierde por las paredes. Sin embargo, al no poder disponer de la temperatura interior y exterior de la pared plana, lo que se hizo fue sustituir éstas por la temperatura de la pila y del ambiente respectivamente. Si aplicamos este cambio, obtenemos la ecuación:

$$\dot{Q}_{p\acute{e}rdidas} = K \cdot (T_{stack} - T_{ambiente})$$

Como se puede observar en la demostración anterior, k es un parámetro fijo puesto que éste depende del material y de la geometría de la pared.

mCp (masa de la pila por su calor específico)

La masa de la pila es, naturalmente, una constante. Por lo que respecta al calor específico de la pila, se tomará constante.

Procedimiento para el ajuste experimental de h, k y mCp

Una vez definidos los parámetros de h, k y mCp, se llega a la conclusión de que h va a depender de la intensidad de la pila y de que k y mCp van a ser constantes.

Para el ajuste de estos tres parámetros, nos ayudamos de las curvas de calentamiento de T8 -temperatura del aire de entrada a la pila- y de Temperature_stack -temperatura de la pila-, de los ensayos 02 y 03 del experimento 1 -ver figuras 18 y 19-.

El proceso que se sigue para la determinación de estos tres parámetros es un procedimiento iterativo partiendo de un valor inicial de éstos. Cuando la dinámica y la estática de las curvas de calentamiento simuladas tanto de la pila como del aire de entrada a la pila, se ajusten bien a las curvas de calentamiento reales tanto en el ensayo 02 como en el ensayo 03 del experimento 1, se darán por concluidas las iteraciones. Este ajuste lo verificaremos, viendo en una misma gráfica las curvas de calentamiento reales y simuladas.

Por lo que respecta al valor inicial que toman estos tres parámetros, sabemos que:

- El coeficiente de convección forzada del aire oscila entre $15 \text{ y } 300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. En los ensayos del experimento 1, se pudo apreciar que el aire saliente de la pila no salía con demasiada velocidad, por lo que iniciaremos h en $15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.
- En estudios previos realizados sobre la pila, se estimó el valor de k entre 0,7 y 3 W/K. Tomaremos como valor inicial $k=1,85$ que corresponde justamente a la media aritmética.
- En estudios previos realizados sobre la pila, se estimó el valor de mCp entre 2500 y 4000 J/K. Tomaremos como valor inicial 3250 que corresponde justamente a la media aritmética.

Una vez conocido el orden de magnitud de los parámetros y el valor inicial que éstos van a tomar, empezamos el proceso iterativo.

Como resultado de este procedimiento, obtenemos las figuras 27 y 28 que muestran de una forma visual el ajuste entre las curvas de calentamiento reales y simuladas.

El valor de los parámetros que dan lugar a las curvas de las figuras 27 y 28 son: $h=20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; $k=0,9 \text{ W}/\text{K}$; $mCp=2800 \text{ J}/\text{K}$

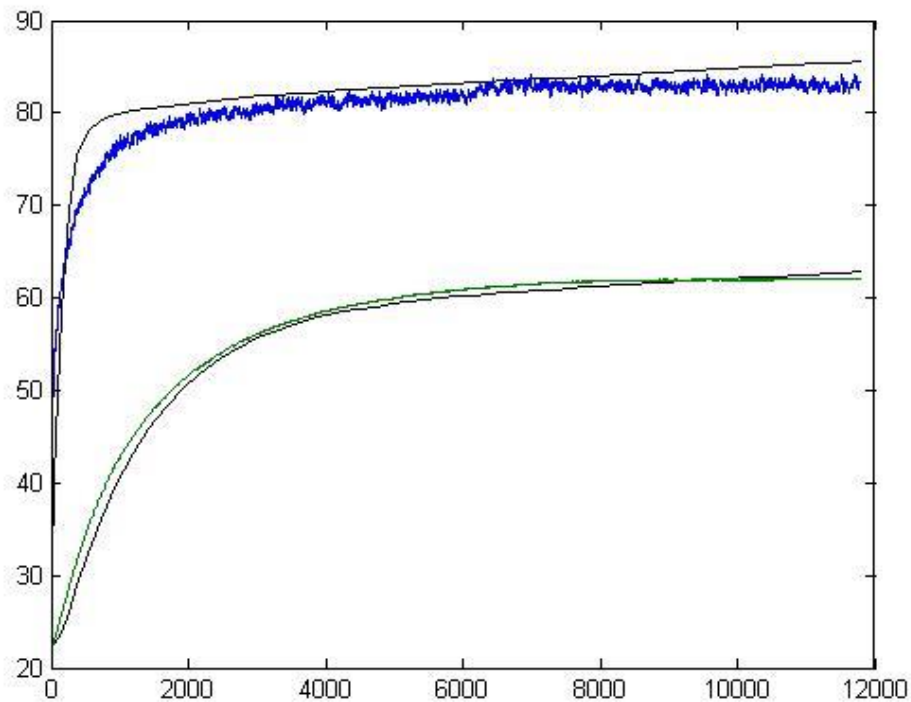


Figura 27 – Experimento 1, ensayo 02: Curvas de calentamiento reales –en negro- y simuladas –en azul T8 y en verde T_stack-

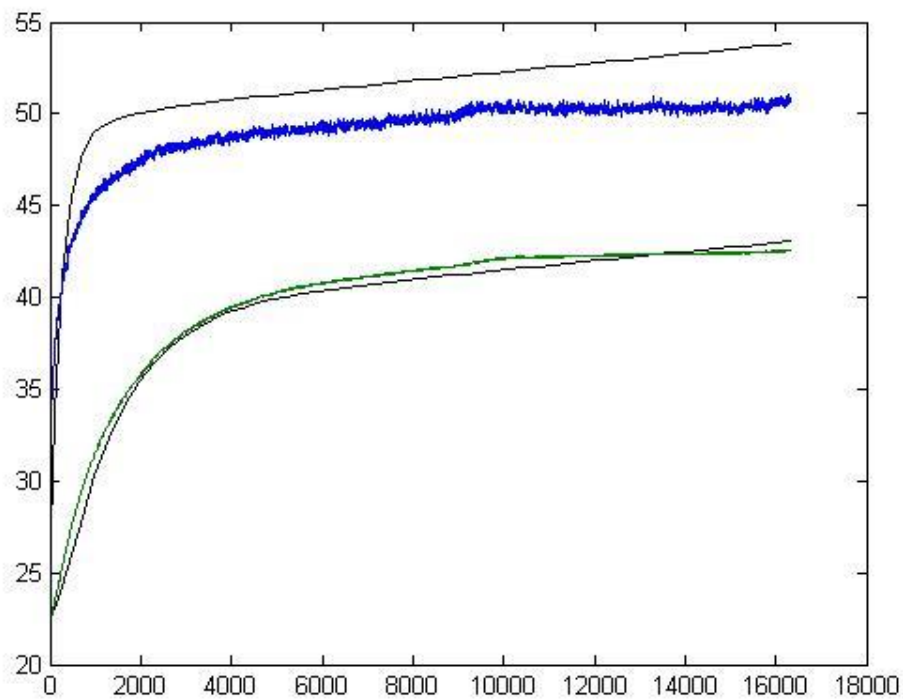


Figura 28 – Experimento 1, ensayo 03: Curvas de calentamiento reales –en negro- y simuladas –en azul T8 y en verde T_stack-

6.4 Validación del modelo para diferentes corrientes de la pila

Para validar el modelo dinámico implementado en MATLAB-Simulink, simularemos, usando los valores de los parámetros encontrados en el apartado “6.3 Ajuste de parámetros”, los casos en que la pila trabaja a intensidad de 22 y 24 amperios. Recordemos, que el único parámetro que se debe de ajustar cada vez que se cambia la intensidad de la pila es el coeficiente de convección $-h$.

Para realizar la validación antes mencionada, nos ayudaremos de la información de un experimento, previo a este proyecto, que se realizó el 5/11/2015 –ver documento Excel “2015_05_11_07_20_TS1”.

La información útil que se extrae del documento Excel “2015_05_11_07_20_TS1”, se resume en la Figura 29:

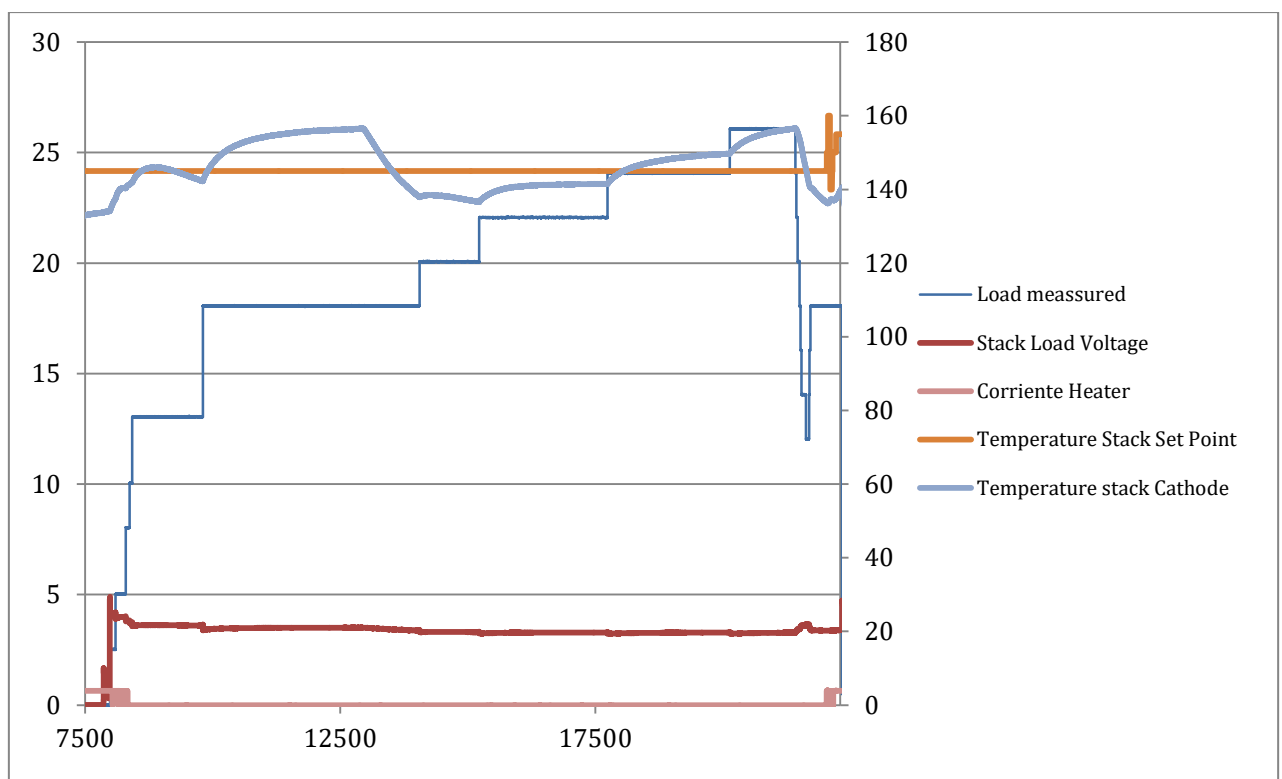


Figura 29 – Curva de calentamiento de la pila. Las tres primeras variables de la leyenda se leen en el eje vertical izquierdo y las unidades están en S.I. Las temperaturas se leen en el eje vertical derecho y están expresadas en °C.

Para la realización de las simulaciones a 22 y 24 amperios, debemos suponer una temperatura ambiente, puesto que carecemos de tal información. Esta temperatura ambiente la supondremos constante y de valor 28 grados centígrados.

Esta validación nos servirá para ver si hay algún valor de h para 22 y 24 amperios capaz de darnos una temperatura de la pila simulada en estado estacionario similar a la real y una dinámica de la pila simulada que no diste mucho de la dinámica real. Al desconocer la evolución de la temperatura ambiente, lo más

probable es que el ajuste entre la curva real y la simulada de la pila sea bastante peor que en los ensayos. Por lo que respecta a h , se espera que este valor tanto para el caso de 22 como 24 amperios no diste mucho del encontrado en los ensayos sin corriente, pues de la multitud de variables de las que depende el coeficiente de convección solamente estamos alterando un poco las propiedades del fluido al trabajar a intensidades de 22 y 24A, puesto que en este caso la temperatura de trabajo de la pila es mayor que en los ensayos.

La simulación a 22 y a 24 amperios, nos da un coeficiente de convección de 21,2 y de 22,4W/(m²K). Las gráficas de dichas simulaciones, se muestran en las figuras 30 y 31.

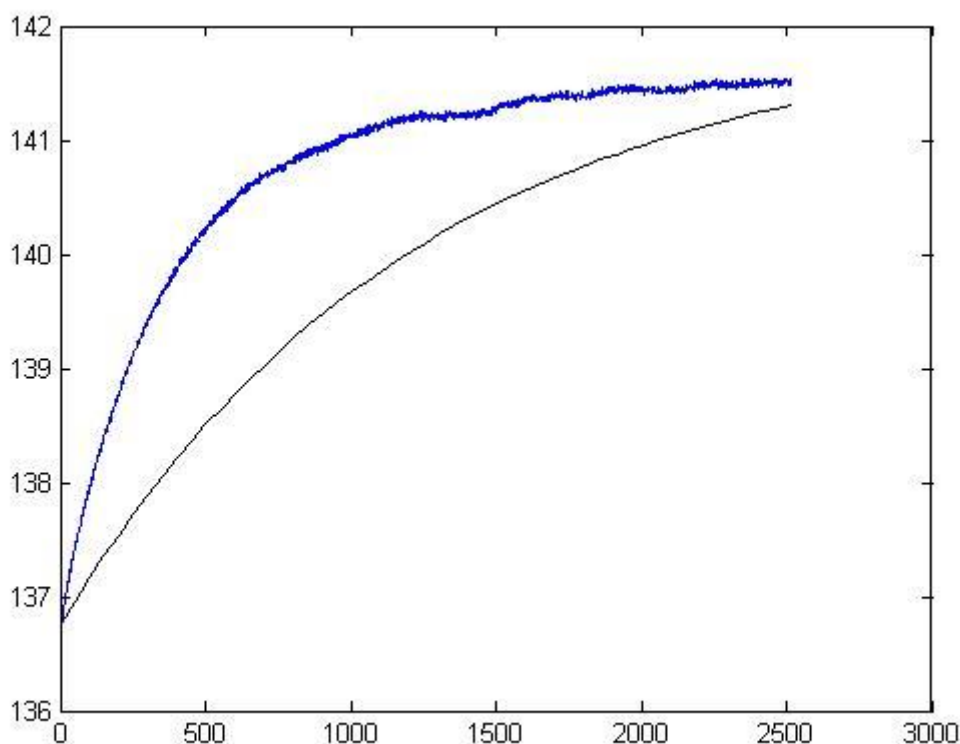


Figura 30 – Experimento 2015_05_11_07_20_TS1, intensidad 22A: Curva de calentamiento de la pila real –en negro- y simulada –en azul-.

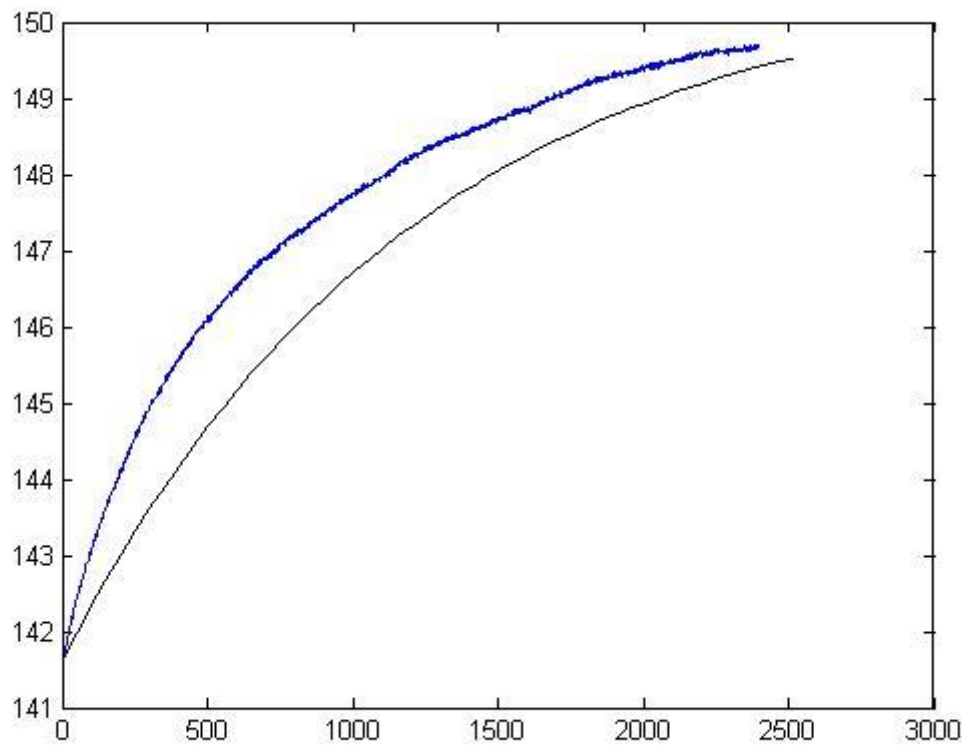


Figura 31 – Experimento 2015_05_11_07_20_TS1, intensidad 22A: Curva de calentamiento de la pila real –en negro- y simulada –en azul-.

Dado que las simulaciones a 22 y 24A, dan unas temperaturas simuladas en estado estacionario muy parecidas a las reales empleando unos coeficientes de convección similares a los encontrados en los ensayos, y que la dinámica de las curvas simuladas tiene cierto parecido a las reales, nos mostramos satisfechos con el ajuste de parámetros hecho en el apartado anterior y damos por bueno el modelo. No obstante, somos plenamente conscientes de las limitaciones que el modelo presenta.

A modo de resumen, las figuras 32a y 32b muestran las temperaturas de la pila en estado estacionario y la constante de tiempo de la curva de calentamiento de ésta en las situaciones de ensayo02 y 03, y cuando la pila trabaja a 22 y 24 amperios. Además, también muestra las temperaturas del aire de entrada en la pila en estado estacionario y la constante de tiempo de la curva de calentamiento del aire, para las situaciones de ensayo02 y 03.

	Curva de la pila real		Curva de la pila simulada	
	tau (s)	valor final (°C)	tau (s)	valor final (°C)
Ensayo 02	1418	62,06	1631	62,83
Ensayo 03	1784	42,56	2005	43,05
Intensidad 22A	349	141,47	966	141,3
Intensidad 24A	630	149,68	964	149,52

Figura 32a – Tabla resumen de las constantes de tiempo y temperaturas en estado estacionario de las curvas de calentamiento reales y simuladas de la pila

	Curva del aire real		Curva del aire simulada	
	tau (s)	valor final (°C)	tau (s)	valor final (°C)
Ensayo 02	148	83,25	188	85,57
Ensayo 03	248	50,79	368	53,8

Figura 32b – Tabla resumen de las constantes de tiempo y temperaturas en estado estacionario de las curvas de calentamiento reales y simuladas del aire de entrada en la pila

6.5 Empleo del modelo dinámico a intensidad de 60 amperios

Para saber qué caudal de aire se requiere para trabajar a una intensidad de 60 amperios utilizamos el modelo de simulación y aplicamos un método iterativo.

El método consiste en determinar el coeficiente de convección del aire, a una velocidad v obtenida a partir de la fórmula:

$$velocidad = \frac{\text{caudal volumétrico}}{\text{área de paso del aire a través de las aletas}}$$

$$\text{Área de paso del aire a través de las aletas} = [3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,4 \cdot 10^{-2}] \cdot 11 = 1,54 \cdot 10^{-3} m^2$$

Una vez calculada la velocidad, nos tenemos que asegurar que ésta sea mayor que 2 y menor que 20m/s, para poderla emplear en la fórmula empírica:

$h = 10.45 - v + 10v^{1/2}$, solamente válida para velocidades comprendidas entre los 2 y los 20m/s.

Siendo:

h : coeficiente de convección del aire

v : velocidad del aire

Una vez calculado h , nos vamos al *script* de MATLAB e insertamos el valor de h_c y el caudal que hemos usado para el cálculo de éste. Si corremos el programa a 60 amperios y la temperatura de la pila en estado estacionario es mayor que 180 grados centígrados, procedemos a aumentar el caudal y volvemos a iterar. Este

proceso se acaba cuando la temperatura de la pila se sitúa entre los 170 y 175 grados centígrados.

Como resultado de este método, tenemos que si hacemos el caudal actual 14 veces mayor, entonces la velocidad del aire que atraviesa las aletas será de 16,94m/s lo que nos dará una $h=34,66\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Si sustituimos estos valores en el *script* de MATLAB y corremos el programa, obtenemos:

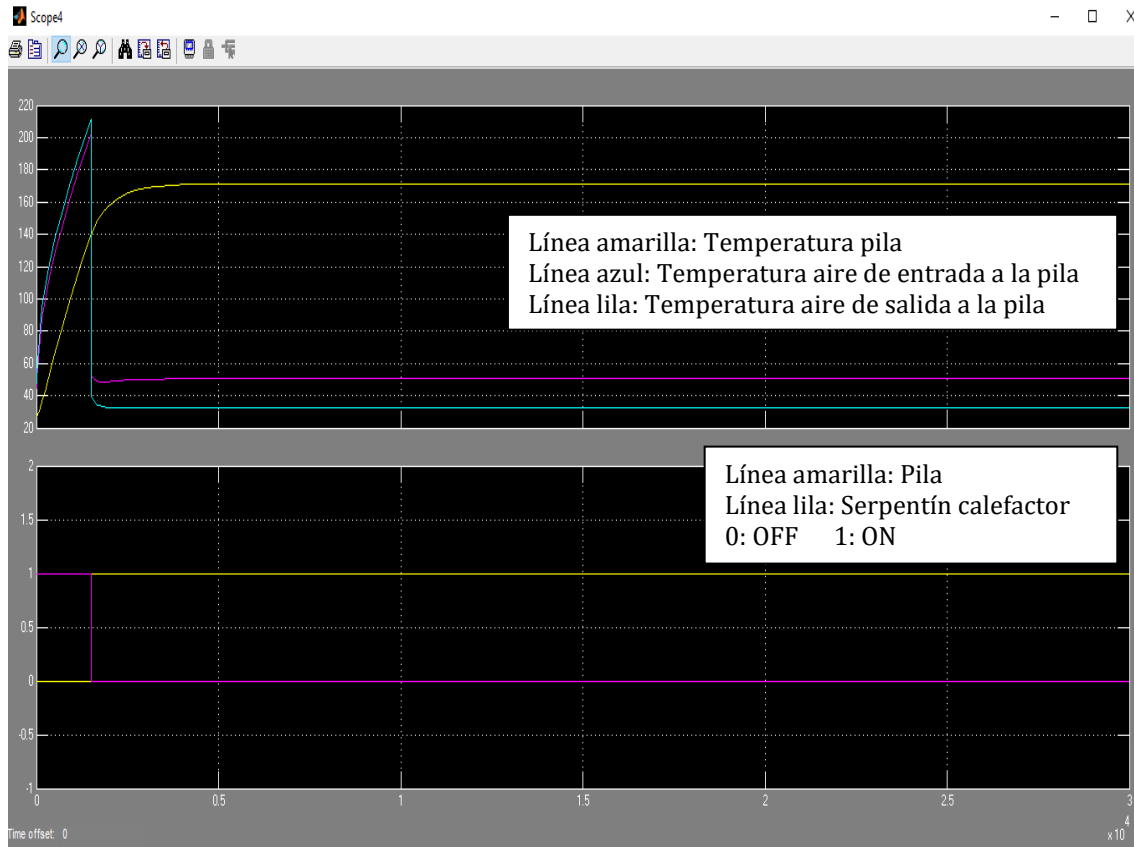


Figura 34 – Curvas de calentamiento de la pila y del aire de entrada y salida de ésta.

Como bien se puede observar en la figura 34, al aumentar el caudal 14 veces hemos conseguido disminuir la temperatura de la pila hasta los 171,2°C. El caudal volumétrico que se requiere es de 91,47m³/h.

7. Soluciones propuestas al problema inicial

7.1 Información técnica de las soluciones

En el apartado “6.5 Empleo del modelo dinámico a intensidad de 60 amperios” se concluyó que el caudal másico de aire que el ventilador debe proporcionar, cuando la pila entrega 60 amperios, es de $91,47 \frac{m^3}{h}$.

Si corremos el programa a esa intensidad y caudal, obtenemos como respuesta la figura 35.

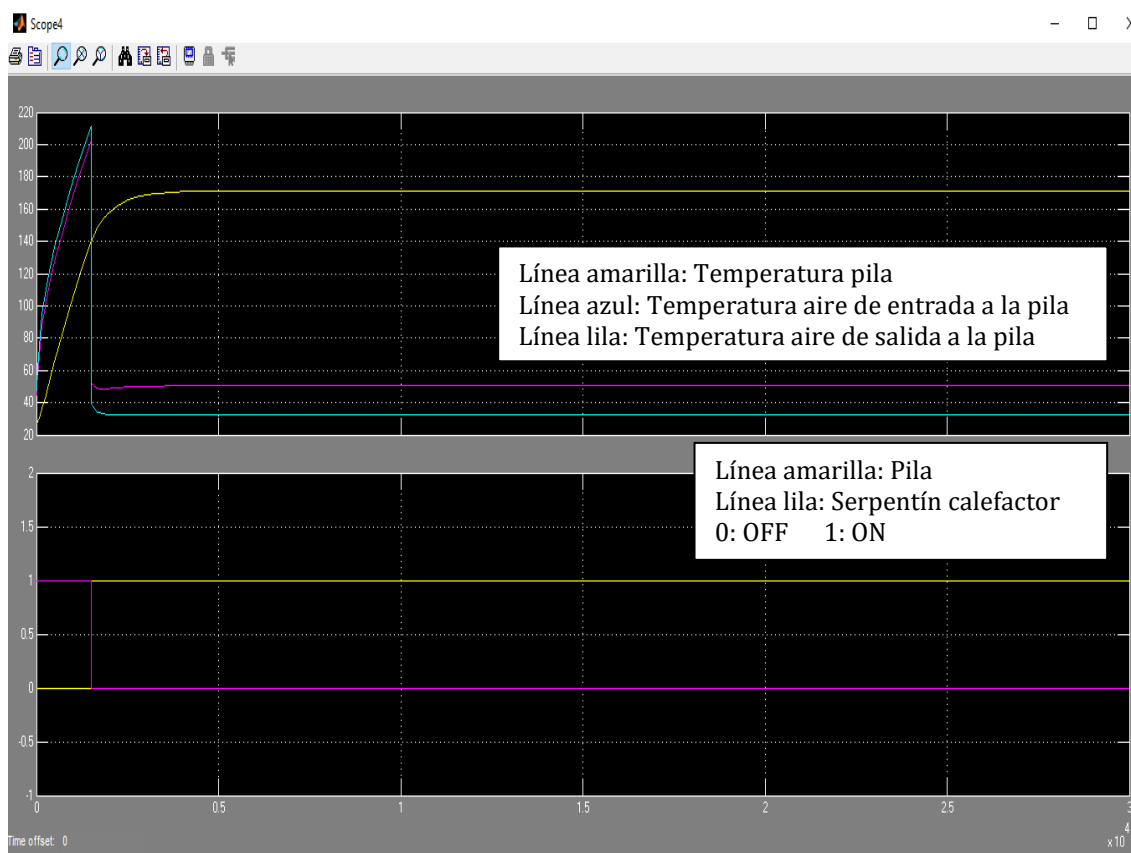


Figura 35 – Curvas de calentamiento de la pila y del aire de entrada y salida de ésta.

La solución que se propone, para que se pueda trabajar a 60 amperios, es sustituir el ventilador actual por un ventilador centrífugo capaz de entregar $91,47 \frac{m^3}{h}$. Este nuevo elemento refrigerador deberá ser capaz de soportar temperaturas de hasta 212°C -temperatura máxima que alcanza el aire que sale del ventilador en la simulación del caso más extremo: 60A-. Además, se le tendrá que poder regular el caudal de aire que entrega para poder mantener una temperatura constante en la pila.

Consultando el mercado, se ha encontrado un ventilador centrífugo de la marca Airtècnics que cumple todas las propiedades antes mencionadas. Las

especificaciones técnicas de este ventilador se muestran subrayadas en la figura 36.

GTA/GRA | De simple aspiración para altas temperaturas

Características



- Motor directo de rotor externo protegido por termocontacto
- Velocidad regulable 0-100°C
- Turbinas equilibradas estática y dinámicamente según norma ISO 1940
- Bajo nivel sonoro
- Temperatura del aire hasta 220°C

Modelo	Tensión V (50 Hz)	Intensidad A	Potencia W	Velocidad rpm	Caudal m³/h	Presión máxima ΔPa	Temp. máx.	Precio Euros/Ud.
2GRA15-97/42L	1x230V	0,14	32	2540	120	180	220°C	176
2GTA15-120/62R	1x230V	0,30	68	1715	270	270	220°C	180
2GTA35-140/59R	1x230V	0,63	136	1635	455	450	220°C	199
4GRA25-180/70R	1x230V	0,24	54	805	395	200	150°C	181
4GTA25-180/70R	1x230V	0,37	83	930	535	220	150°C	195
4GRA45-180/92R	1x230V	0,56	128	1065	740	230	150°C	229

Figura 36 – Características técnicas de diferentes ventiladores centrífugos de la empresa Airtècnics.

8. Análisis económico del TFG

El coste total que ha supuesto el desarrollo de este proyecto, se puede desglosar en:

- Coste del personal.
- Coste del desgaste de las herramientas.
- Factura eléctrica.
- Factura de hidrógeno y oxígeno.

Comentar que en el presente trabajo no se ha encendido la pila de combustible y por lo tanto no se ha consumido ni hidrógeno ni oxígeno. Sin embargo, se han requerido datos de un experimento anterior a este proyecto en el que la pila estaba encendida. La factura de hidrógeno y oxígeno que aquí se presenta es una estimación del coste que hubiera supuesto obtener tales datos.

Coste del personal:

Concepto	Número de horas	Precio/hora (€)	Total (€)
Planificación de los experimentos	6	12	72
Calibración de los termopares	4	12	48
Experimentos llevados a cabo por el técnico	14	20	280
Desarrollo del modelo	60	12	720
Validación del modelo	30	12	360
TOTAL MANO DE OBRA			1480

Coste del desgaste de las herramientas:

Herramienta	Unidades	Precio (€)	Vida útil (meses)	Consumo (meses)	Total (€)
Ordenador portátil	1	700	60	5	58,333
Calculadora HP	1	120	84	5	7,143
Termopar tipo K	7	8,47	72	1	0,823
Conector termopar	7	3,13	72	1	0,304
TOTAL					66,60

Factura eléctrica

Concepto	Potencia (kW)	horas	€/kWh	Total (€)
Experimento 1: Ensayo 1	0,01	0,5	0,14215	0,000710
Experimento 1: Ensayo 2	0,111	3,317	0,14215	0,052337
Experimento 1: Ensayo 3	0,048	4,717	0,14215	0,032185
TOTAL FACTURA ELÉCTRICA				0,09

Consumo de hidrógeno y oxígeno para trabajar a una intensidad de 18, 22 y 24 amperios

Datos

La pila tiene 12 celdas

$\lambda_{H_2} = 1,3$ –coeficiente estequiométrico del hidrógeno de entrada-

$\lambda_{O_2} = 2,2$ –coeficiente estequiométrico del oxígeno de entrada-

Propiedades

$$N_{avog} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

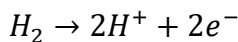
$$F = 96,487 \text{ C/mol}$$

$$q_{el} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\rho_{aire} = 1,1846 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\rho_{H_2} = 0,0674 \frac{Kg}{m^3}$$

Cálculo del consumo de hidrógeno y oxígeno a intensidad I



$$n_{H_2} = \frac{I}{nF} = \frac{I}{2 \cdot 96,487} = \frac{I}{192,97} \frac{\text{mol } H_2}{h}$$

En una monocelda, el flujo másico de H_2 a consumir es:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{I}{192,97} \frac{\text{mol } H_2}{h} \cdot \frac{2,0158 \text{ g } H_2}{1 \text{ mol } H_2} = 0,010446 \cdot I \frac{\text{g } H_2}{h}$$

El flujo másico total es $\dot{m}_{H_2} = 0,010446 \cdot I \frac{\text{g } H_2}{h} \cdot 12 = 0,1253 \cdot I \frac{\text{g } H_2}{h}$

$$U_F = \frac{1}{\lambda_{H_2}} = \frac{\dot{m}_{H_2 \text{ cons}}}{\dot{m}_{H_2 \text{ IN}}} \rightarrow \dot{m}_{H_2 \text{ IN}} = 0,1253 \cdot I \cdot 1,3 = 0,16296 \cdot I \frac{\text{g } H_2}{h}$$

$$Q_{H_2 \text{ IN}} = 0,16296 \cdot I \frac{\text{g } H_2}{h} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{67,4 \text{ g } H_2} \cdot \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 0,040296 \cdot I \frac{\text{l } H_2}{\text{min}}$$

$$n_{O_2} = \frac{0,16296 \cdot I \text{ g } H_2}{h} \cdot \frac{1 \text{ mol } H_2}{2,0158 \text{ g } H_2} \cdot \frac{1 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } H_2} = 0,04042 \cdot I \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$n_{O_2 \text{ IN}} = 0,04042 \cdot I \frac{\text{mol } O_2}{h} \cdot 2,2 = 0,088925 \cdot I \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$Q_{O_2 \text{ IN}} = 0,088925 \cdot I \frac{\text{mol } O_2}{h} \cdot \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 O_2}{89 \text{ g } O_2} \cdot \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 0,53288 \cdot I \frac{\text{l } O_2}{\text{min}}$$

Factura de hidrógeno

Concepto	Intensidad (A)	Consumo de H ₂ (L/min)	Tiempo (min)	€/L	Total (€)
Datos antiguos	18	0,725328	71	0,00261	0,13
Datos antiguos	22	0,886512	43	0,00261	0,10
Datos antiguos	24	0,967104	41	0,00261	0,10
FACTURA HIDRÓGENO					0,34

Factura de oxígeno

Concepto	Intensidad (A)	Consumo de O ₂ (L/min)	Tiempo (min)	€/L	Total (€)
Datos antiguos	18	9,59184	71	0,00099	0,68
Datos antiguos	22	11,72336	43	0,00099	0,50
Datos antiguos	24	12,78912	41	0,00099	0,52
FACTURA OXÍGENO					1,70

Coste total del proyecto

TOTAL MANO DE OBRA	1.480,00 €
TOTAL FACTURA ELÉCTRICA	0,09 €
TOTAL DESGASTE HERRAMIENTAS	66,60 €
FACTURA HIDRÓGENO	0,34 €
FACTURA OXÍGENO	1,70 €
COSTE TOTAL DEL PROYECTO	1.548,73 €

9. Impacto medioambiental y social

9.1 Impacto medioambiental

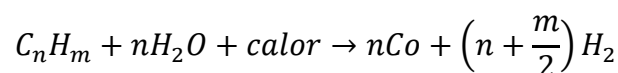
Las tareas que se han llevado a cabo para la realización de este proyecto han provocado un cierto impacto medioambiental, ya sea de forma directa y/o indirecta.

En los ensayos realizados en el laboratorio solo se hizo uso de la resistencia y del ventilador por lo que no provocaron emisiones. Ahora bien, estos elementos deben ser alimentados con energía eléctrica. Esta energía puede haber sido generada a partir de fuentes renovables o no renovables. Al desconocer la procedencia de ésta, no se puede saber si los ensayos han provocado un impacto medioambiental de una forma indirecta.

Para el desarrollo de este proyecto, se ha extraído información de diferentes experimentos llevados a cabo con la pila encendida. Ésta consume hidrógeno durante el tiempo en que está encendida. El hidrógeno no es una fuente de energía primaria porque no se encuentra libre en la naturaleza, por lo que éste debe ser producido a partir de un proceso industrial. La tecnología más usada actualmente para la obtención de hidrógeno es el reformado de hidrocarburos con vapor de agua.

El reformado de hidrocarburos con vapor de agua es el proceso mediante el cual el metano u otros hidrocarburos se convierten en hidrógeno y monóxido de carbono por reacción con vapor de agua.

El proceso de reformado de hidrocarburos con vapor de agua, puede describirse formalmente por las ecuaciones siguientes:



9.2 Impacto social

Las pilas PEM son una tecnología energética muy prometedora gracias a sus múltiples aplicaciones y a sus bajas o cero emisiones –si el combustible se produce mediante energías renovables-. Las propiedades de las que disponen las hacen muy atractivas, sobre todo si se comparan con otras tecnologías convencionales de conversión de energía. Algunas de estas propiedades son:

Silenciosas: Al no disponer de partes móviles, el ruido que genera una pila es muy bajo. Esta característica las hace especialmente interesantes en el ámbito militar.

Modulares: Se puede elevar la potencia generada en una pila mediante el apilamiento de celdas.

Bajas o cero emisiones: Al emplear hidrógeno como combustible, las emisiones resultantes de una pila son cero, si el mismo se ha producido a partir de energías renovables, puesto que los productos de la reacción química son agua y calor. El empleo de estas pilas en el sector del automóvil contribuiría a reducir la alta contaminación del aire que hay actualmente en las ciudades.

Vida útil larga: Al no disponer de partes móviles se espera que las pilas puedan ser, en un futuro no muy lejano, muy duraderas.

Alta eficiencia: La eficiencia de un sistema de pila de combustible es actualmente tan alta como la de las centrales térmicas, por lo que pueden emplearse como sistemas de generación descentralizados.

Así pues, las pilas PEM provocan un impacto social positivo al conjunto de la sociedad gracias a que pueden ser usadas en múltiples aplicaciones y a las propiedades de las que disponen.

Conclusiones

Una vez finalizado por completo el proyecto, se llega a las siguientes conclusiones:

En primer lugar, mediante el uso de un modelo dinámico se ha logrado determinar el dimensionado de un ventilador que permita que la pila de combustible pueda llegar a trabajar hasta los 60 amperios. Para conseguir este modelo lo primero que se hizo fue estudiar las leyes físicas que describen el sistema en cuestión. Una vez estudiado, se llevaron a cabo una serie de experimentos que tenían como objetivo proporcionarnos información para la determinación de ciertos parámetros. Posteriormente, se implementó el modelo en Simulink-MATLAB y se ajustaron los parámetros a partir de los experimentos realizados y de experimentos anteriores. Gracias a la simulación se averiguó qué caudal de aire requería nuestro sistema y se decidió entonces optar por un ventilador centrífugo como elemento refrigerante.

En segundo lugar, se ha implementado en el modelo dinámico un controlador preliminar basado en una acción proporcional -controlador P- que tiene el caudal másico como variable manipulada y la temperatura de la pila como variable controlada.

En tercer lugar, el modelo también permite la visualización en función del tiempo del voltaje dado por la pila de combustible, el valor de los calores que intervienen en el sistema y las temperaturas de entrada y salida del aire de la pila, así como la temperatura de ésta. Cabe destacar, que este tipo de modelo, implementado en MATLAB, es adecuado para el diseño de controladores.

Durante el desarrollo del presente trabajo se han puesto de relieve ciertas limitaciones del modelo térmico. La creación de un modelo en el entorno de ANSYS Fluent nos permitiría conocer con exactitud los gradientes de temperatura en la pila de combustible con el objetivo de evitar tensiones internas y evitar así el deterioro o la ruptura de sus componentes. A este estudio, le seguiría la automatización de los medios de refrigeración -ventanas-.

Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a la tutora de este proyecto, Maria Serra, quién en su momento me brindó la oportunidad de poder realizar este proyecto y quién me ha asesorado y ayudado en todo momento.

También agradecer a los siguientes miembros del equipo del Laboratorio de Pilas de Combustible del Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (IRI), CSIC-UPC: Attila, Vicente, Uxía y especialmente a Miguel por haberme ayudado a esclarecer las diferentes dudas que me fueron surgiendo durante el desarrollo del proyecto.

Por último, agradecer al profesor Ricardo Torres por las sugerencias recibidas.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] NATALIA MORLANÉS SÁNCHEZ. *Obtención de hidrógeno mediante reformado catalítico de nafta con vapor de agua*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia: 2008
- [2] JAMES LARMINIE AND ANDREW DICKS. *Fuel cell systems explained*. John Wiley & Sons Ltd: 2003
- [3] USERS MANUAL. *High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells)*. ZBTHT: 2012
- [4] AIRTECNICS. *Productos*.
[http://www.airtecnics.com/intranet_files/docs/ca/catalegs/AIRTECNICS_TARIFA_DE_PREUS_CASTELLA.pdf, 13 de abril de 2016]
- [5] FÉLIX BARRERAS, ANTONIO LOZANO. *Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM*.
[<http://www.energia2012.es/sites/default/files/Hidr%C3%B3geno.%20Pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20PEM.pdf>, 11 de marzo de 2016]
- [6] ZENTRUM FÜR BRENNSTOFFZELLENTÉCHNIK S.L. *Sitio web oficial*.
[<http://www.zbt-duisburg.de/en/meta-menu/home/>, 3 de febrero de 2016]

Bibliografía complementaria

ANTONIO MAYANDÍA AGUIRRE. *Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico*. Proyecto final de curso. Universidad Carlos III de Madrid: 2009.

MIGUEL ÁNGEL RUBIO GONZÁLEZ. *Modelado dinámico de pilas de combustible en el contexto del control automático*. Tesis doctoral. UNED: 2008.

Anexo

Constante de Faraday (96.487 C/mol): Indica la carga de un mol de electrones.

Curva de polarización de la pila: Es una gráfica voltaje-intensidad.

Electrodo: Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito.

Energía libre de Gibbs: Energía disponible para realizar trabajo externo, sin tener en cuenta ningún trabajo hecho por cambios de presión y/o volumen. En una pila de combustible el trabajo externo significa el movimiento de electrones alrededor de un circuito externo.

Entalpía: Es la energía libre de Gibbs más la energía relacionada con la entropía.

Exactitud: La exactitud es el grado de concordancia entre el valor verdadero y el experimental. Un aparato es exacto si las medidas realizadas con él son todas muy próximas al valor "verdadero" de la magnitud medida.

Exergía: Todo trabajo externo que se puede extraer, incluyendo aquel debido a cambios de volumen y presión.

Multiplexor: En el campo de la electrónica el multiplexor se utiliza como dispositivo que puede recibir varias entradas y transmitir las por un medio de transmisión compartido. Para ello lo que hace es dividir el medio de transmisión en múltiples canales, para que varios nodos puedan comunicarse al mismo tiempo.

Precisión: La precisión es el grado de concordancia entre una medida y otras de la misma magnitud realizadas en condiciones sensiblemente iguales. Un aparato es preciso cuando la diferencia entre diferentes medidas de una misma magnitud es muy pequeña.

Relé: Dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy débil, abre o cierra un circuito en el cual se disipa una potencia mayor que en el circuito estimulador.

Sensibilidad de un aparato de medida: La sensibilidad de un aparato es el valor mínimo de la magnitud que es capaz de medir.

Termopar: Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña -del orden de los milivoltios- que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado «punto caliente» y el otro llamado «punto frío» (efecto Seebeck).

Transductor: Dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente a la salida, pero de valor muy pequeños en términos relativos con respecto a un generador.

